POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Ottimizzazione processo di Selective Laser Sintering per la produzione di componenti in materiale composito

Relatori

Prof. Luca Iuliano

Ing. Manuela Galati

Ing. Flaviana Calignano

Candidato

Luca de Siervo

Ottobre 2021

Indice

Abstract 1

Introduzione 2

Capitolo 1: Additive Manufacturing 4

1.1 Stato dell'arte 7

1.2 Il processo: Selective Laser Sintering 9

1.2.1 Principali parametri di processo 12

1.3 Il materiale: PA2200 e Alumide 16

1.4 Campi di applicazione 23

Capitolo 2: Studio dell'influenza dei parametri per la PA2200 26

2.1 Preparazione provini 26

2.2 Realizzazione del DoE 31

2.3 Secondo Job: Cubetti 33

2.3.1 Energy Density 33

2.3.2 Preparazione e realizzazione del Job 39

2.3.3 Risultati 41

Capitolo 3: Sperimentazione sul composito: l'Alumide 45

3.1 Ottimizzazione dei parametri di processo 45

3.1.1 Produzione Cubetti DoE 45

3.1.2 Analisi della densità mediante principio di Archimede 59

3.2 Caratterizzazione meccanica: Tensile Test 66

Capitolo 4: Risultati e discussione 75

Conclusioni 90

Bibliografia 92

Ringraziamenti 97

Abstract

Le tecnologie di additive manufacturing (AM) hanno numerose applicazioni in diversi settori industriali, in virtù della loro capacità di realizzare componenti aventi eccellenti caratteristiche meccaniche e con un peso inferiore e un design complesso, lasciando piena libertà al progettista. Tuttavia, essendo tecnologie AM relativamente nuove, grande spazio alla ricerca è dedicato nell'ambito dello sviluppo del processo per nuovi materiali, inclusi i compositi.

Il lavoro di tesi presentato si inserisce in tale contesto e analizza le potenzialità del processo di Selective Laser Sintering per la produzione di Alumide, composito costituito da polveri di poliammide e alluminio. Il lavoro è stato svolto presso i laboratori Integrated Additive Manufacturing (IAM@polito).

Dopo una prima fase di studio del processo, si è adoperata una metodologia basata sul Design of Experiment (DoE) al fine di analizzare l'influenza di alcuni dei parametri caratteristici sulla densità del pezzo finale, identificando in questo modo i valori ottimali per il processo in esame. La combinazione ottimale di parametri è stata utilizzata per la produzione di provini per prove di trazione con lo scopo di attuare una caratterizzazione meccanica in accordo alla normativa EN ISO 527-1:2019. L'analisi dei risultati ha evidenziato come più di una combinazione di parametri possa essere considerata ottimale dal punto di vista della densità. Tuttavia, la combinazione selezionata permette di controllare meglio la produttività del processo. Le proprietà meccaniche ottenute sono in linea con quelle fornite dai datasheet. Seppur in quantità minima, la presenza dell'Alluminio ha incrementato in maniera significativa il valore di rigidezza rispetto a quella della matrice polimerica.

Introduzione

La costante crescita dello sviluppo tecnologico negli ultimi quindici anni ha permesso all'industria mondiale di affacciarsi, in ogni suo settore, alla fase dell'industria 4.0, caratterizzata da nuove ed avanzate metodologie per attuare una produzione dall'alto livello qualitativo ma in tempi ristretti. Un simbolo di questa nuova direzione presa in ambito industriale è rappresentato dall'Additive Manufacturing (AM).

L'Additive Manufacturing, o Fabbricazione Additiva, si focalizza sulla realizzazione di componenti complessi, riducendone il peso in modo da conservare solo il necessario ai fini del funzionamento. Queste potenzialità hanno suscitato l'interesse dei grossi settori manifatturieri della meccanica, dell'aerospazio e del biomedicale; queste tecnologie, ancora in fase di sviluppo, presentano un know-how che necessita ancora di espandersi.

Per interfacciarsi meglio con tutte le richieste dell'industria moderna, vengono sviluppati continuamente nuovi materiali e nuove macchine per la produzione; a tal proposito, il mercato dei materiali compositi riveste un'importanza sempre maggiore, grazie alla capacità di tali materiali di presentare le migliori proprietà dei costituenti

Il presente lavoro di tesi si pone l'obiettivo di legare il vantaggio dell'utilizzo di un materiale composito come l'Alumide, caratterizzato da una rigidezza molto elevata rispetto ai materiali polimerici maggiormente usati, a fronte di un valore di densità comunque contenuto, con la necessità di stabilire le condizioni ottimali per la produzione dello stesso con le nuove tecnologie disponibili sul mercato dell'Additive Manufacturing.

L'elaborato è suddiviso in tre sezioni principali. Nel primo capitolo vengono mostrate le tecniche disponibili, presentando una breve panoramica dei vantaggi che caratterizzano le tecnologie di Additive Manufacturing. Si va poi a presentare nel dettaglio la tecnica utilizzata per lo svolgimento dell'attività sperimentale, denominata Selective Laser Sintering, e i materiali oggetto dello studio di tesi, con particolare interesse per l'Alumide, le sue caratteristiche e i possibili settori di utilizzo. Viene inoltre presentato brevemente lo stato dell'arte delle ricerche sull'Alumide processato con le tecnologie di AM.

Nella seconda sezione vengono descritti i passaggi eseguiti per lo studio del processo di Selective Laser Sintering utilizzando un materiale come la poliammide (PA2200), di cui

sono ben noti i parametri standard e le caratteristiche raggiunte dai pezzi prodotti con ciascuna macchina. In questo modo si è potuto individuare quali sono i parametri su cui è possibile agire per modificare il risultato di un Job, e in che modo essi agiscono sul processo ed interagiscono tra di loro.

L'ultima sezione, che rappresenta il fulcro della tesi, è suddivisa in due capitoli. Si descrivono tutti i passaggi seguiti per identificare i parametri ottimali mediante l'utilizzo di un Full-Factorial Design of Experiment per produrre dei campioni; successivamente tali campioni sono stati sottoposti a delle misure di densità, caratteristica scelta come parametri principale di scelta tra i parametri. Si prosegue producendo un set di provini di trazione, al fine di svolgere i necessari test per caratterizzare i campioni; con quest'ultimo passaggio si è anche studiata l'influenza dell'orientazione spaziale dei provini all'interno del volume di lavoro sulle caratteristiche meccaniche degli stessi. Si passa poi, nell'ultimo capitolo, all'analisi dei risultati nel loro insieme.

Capitolo 1: Additive Manufacturing

L'Additive Manufacturing (AM) rappresenta una tecnologia fortemente innovativa nell'ambito della produzione industriale, in quanto rende possibile l'ottenimento di oggetti, anche di forma complessa, mediante un processo che si discosta da quello tradizionale (di tipo sottrattivo). La Fabbricazione Additiva viene definita come un processo produttivo industriale in cui un oggetto viene realizzato aggiungendo strato su strato di un determinato materiale, seguendo con precisione più o meno elevata le istruzioni di un modello digitale, ottenuto tramite CAD.

Le origini di questa tecnologia risalgono all'inizio degli anni '80, in cui Chuck Hull presentò il brevetto per la SLA (Stereolithography) [1]; nella prima metà degli anni 2000 le discussioni sulla corretta terminologia portarono alla nascita della definizione di Additive Manufacturing, nome più adatto ad esprimere il legame che si era venuto a creare tra la tecnologia ed il prodotto finale. Poiché diversi pezzi vengono realizzati ormai direttamente tramite queste macchine non era più corretto riferirsi ad essi come prototipi.

L'espressione ufficiale indica tutte quelle applicazioni che sfruttano una tecnologia che è in grado di unire uno o più materiali per realizzare dei pezzi, partendo dai dati ottenuti da un modello CAD 3D e sovrapponendo i vari strati. Ciascuno strato rappresenta una sottile sezione trasversale della parte originata dai dati provenienti dal CAD; necessariamente ciascun layer, avendo spessore finito, per cui vi sarà una approssimazione della parte, tanto più precisa quanto minore sarà lo spessore di ciascuno strato.

I vantaggi che si hanno nell'utilizzo delle tecnologie di Additive Manufacturing sono numerosi:

- Il principale punto di forza consiste nella possibilità di realizzare componenti, anche di notevole complessità geometrica, che presentano la massima leggerezza possibile, disponendo il materiale solo dove è necessario ai fini strutturali e funzionali;
- L'integrazione di più funzioni in un unico componente, permettendo una riduzione dei tempi e della manodopera necessari;

- L'abilitazione del Conformal Cooling, permettendo al progettista di realizzare canali di raffreddamento complessi e che seguano al meglio il profilo del pezzo e riducendo le distorsioni termiche e il tempo ciclo;
- Viene data la massima libertà al progettista per quanto riguarda le geometrie realizzabili, permettendo una maggiore ergonomicità;
- Viene permessa la migliore messa a punto delle proprietà meccaniche del pezzo, grazie anche alla possibilità di adoperare eventualmente materiali differenti nel componente a seconda delle proprietà richieste;
- Possibilità di avere una porosità controllata, ottenibile sia in fase di progetto ma, soprattutto, intrinseca nelle lavorazioni di AM.

Negli anni il numero delle diverse tecnologie disponibili sul mercato è cresciuto, così come la varietà di materiali utilizzabili. Come mostrato in Figura 1, è possibile individuare due grosse famiglie di macchine, a seconda che si lavori con i polimeri o i metalli; successivamente le tecnologie possono essere suddivise in base alla forma del materiale di partenza e alla tipologia di processo.

Esistono macchine in grado di lavorare con materiali particolari, come i ceramici o gli organici, ma il loro impiego nell'ambito industriale è ancora ridotto.

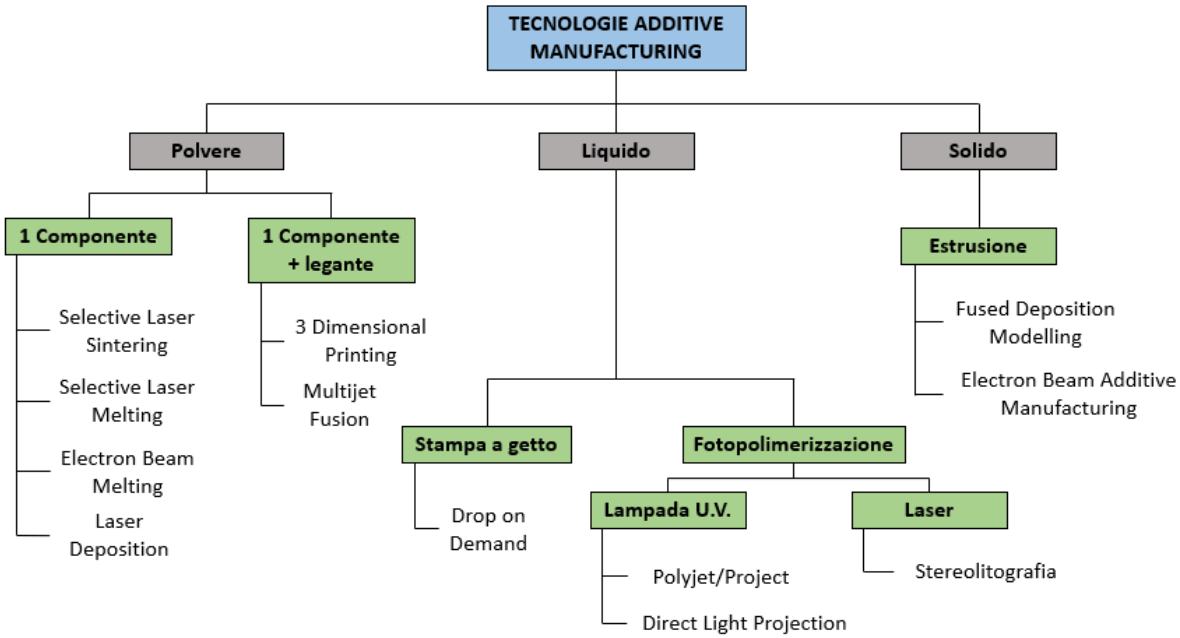


Figura 1 – Schema riassuntivo tecnologie di Additive Manufacturing disponibili sul mercato [2]

Tra tutte le tecnologie elencate in Figura 1, le prime che si diffusero sul mercato furono quelle che trattavano materiali polimerici; questo è legato al fatto che le temperature caratteristiche dei materiali polimerici sono più basse rispetto a quelle dei metalli.

Tra le macchine che lavorano anche, o solo, con materiali polimerici si individuano quelle che utilizzano un filamento di polimero allo stato solido (fused deposition modelling o FDM), quelle che partono dal polimero allo stato liquido e che si differenziano in base alla tecnica utilizzata, e, infine, quelle a letto di polvere (selective laser sintering o SLS).

Poiché l'Additive Manufacturing è una tecnologia di recente diffusione, le tecnologie e i materiali processabili disponibili sul mercato sono in costante cambiamento, e risulta quindi necessario un grande lavoro di ricerca al fine di accrescere il know-how disponibile. Di pari passo con la crescita a livello industriale dell'Additive Manufacturing, si è assistito ad un incremento del panorama dei materiali processabili.

Ad oggi tra i materiali polimerici più diffusi troviamo l'ABS (acrilonitrile-butadiene-stirene), il policarbonato, polietilene e soprattutto la poliammide (anche noto come nylon); per quanto riguarda invece le polveri metalliche, oltre alle diverse tipologie di acciaio, le più adoperate sono le polveri di alluminio, titanio, nickel e rame.

L'incremento dei materiali disponibili, unito ai vantaggi che caratterizzano l'additive manufacturing hanno portato all'utilizzo di queste tecnologie in tutti i campi produttivi, dalle industrie del settore automobilistico, a quelle aerospaziali, passando per l'ambito biomedicale fino ad arrivare alla gioielleria.

Le richieste di performance sempre migliori hanno portato recentemente allo sviluppo di materiali che siano in grado di superare gli standard garantiti fino a questo momento.

A tal proposito, vi sono applicazioni dove risulta fondamentale ottenere un componente leggero ma che possieda comunque delle elevate proprietà meccaniche e termiche; questo interesse sta portando allo sviluppo di diversi materiali compositi, ed in particolare a quelli ottenuti dai polimeri rinforzati con fibre metalliche.

Questa classe è stata però ostacolata nel suo sviluppo dal difficile processamento per vie tradizionali e dagli elevati costi di produzione; tuttavia, queste problematiche potrebbero essere risolte grazie all'impiego dell'Additive Manufacturing.

Utilizzando una tecnologia giovane risulta chiaro come sia ancora necessario individuare prima i parametri ottimali per la realizzazione del componente desiderato con il materiale composito scelto, e solo successivamente valutarne le proprietà finali.

L'obiettivo di questa tesi è dunque l'ottimizzazione del processo produttivo di un materiale composito ottenuto dalla combinazione delle polveri di poliammide 12 e di alluminio, Alumide, processato mediante selective laser sintering. Poiché di tale materiale non sono disponibili dei parametri, si è adoperato un approccio basato su un Full-Factorial Design of Experiment (DoE) per individuare i parametri ottimali per la produzione, avvalendosi per la scelta di analisi sulla densità e sulla precisione dimensionale. Una volta portata a termine questa prima operazione necessaria, si potrà procedere all'analisi delle proprietà meccaniche, realizzando dei provini e sottoponendoli a prove di trazione e flessione su tre punti, adoperando le machine disponibili in laboratorio.

1.1 Stato dell'arte

Si è potuto constatare come l'ammontare di opere in letteratura riguardo l'Alumide sia abbastanza scarso e ridotto. Sebbene tale composito sia costituito in grossa parte da polvere di nylon, la presenza dell'Alluminio ne influenza notevolmente le proprietà e l'aspetto finale, ed è possibile che venga influenzato anche il processo di stampa in termini di parametri macchina.

Mazzoli et al. [3] hanno stabilito come una parte sinterizzata a partire dalla polvere di poliammide caricata con alluminio (AlpaCem - AC) presenti un'accuratezza dimensionale superiore, nell'ordine del centesimo di millimetro, rispetto alla più comune poliammide (nota commercialmente come DuraForm - DF), probabilmente in virtù del fatto che il composito mostra una maggiore stabilità rispetto alla semplice PA grazie alle particelle di Alluminio.

Wen et al. [4], nel loro studio, hanno focalizzato la loro attenzione sulla crescita marcata delle proprietà meccaniche di provini realizzati in polvere di poliammide caricata al 50% di alluminio rispetto a quelle di provini analoghi ma realizzati mediante polvere di poliammide pura. Tuttavia, la polvere del composito da loro adoperata è stata ottenuta mediante un particolare processo di dissoluzione-precipitazione, in cui le particelle del materiale che

funge da rinforzo vengono in un primo momento disperse uniformemente in una soluzione alcolica di PA mediante oscillazione ultrasonica e agitazione costante a circa 160 °C e successivamente, durante la fase di raffreddamento, la PA contenuta nella soluzione cristallizza utilizzando le particelle del filler come nuclei. Questo sistema è differente dalla più classica miscelazione meccanica della polvere di PA pura e delle particelle del rinforzante.

Il maggior numero di ricerche sull'Alumide è stato svolto da Stoia et al. [5], [6], [7], [8], [9], [10]; nelle loro ricerche i vari autori hanno studiato le varie proprietà meccaniche e l'accuratezza geometrica di provini realizzati sia in PA2200 che in Alumide, realizzando un confronto al fine di identificare le potenzialità del materiale ed i possibili utilizzi nei vari campi. Gli autori hanno sottolineato come i provini realizzati in Alumide, rispetto a quelli prodotti utilizzando la poliammide come materiale di partenza, presentano una rigidezza più alta, inoltre anche le proprietà a flessione vengono influenzate dal diverso materiale. Tuttavia, per le loro analisi hanno sempre utilizzato provini prodotti mediante la EOS Formiga P100 e sfruttando gli stessi parametri per entrambi i materiali.

Come si è detto in precedenza, pochi studi hanno affrontato il problema della determinazione dei parametri macchina migliori per il composito formato da poliammide e alluminio, attuando una vera e propria ottimizzazione dei parametri macchina.

Proprio questo è il primo obiettivo che questa tesi si pone, mediante la realizzazione di un Design of Experiment (DoE) finalizzato ad ottenere diverse combinazioni di parametri e di stabilirne quelli ottimali. In un secondo momento, identificati i parametri migliori, si procederà alla stampa di campioni di trazione e flessione, per studiarne le proprietà meccaniche; con questo scopo, i provini verranno stampati lungo direzioni differenti, identificate come primarie e secondarie, lungo tutto il volume di lavoro.

1.2 Il processo: Selective Laser Sintering

Le tecniche a letto di polvere (PBF) sono state tra le prime tecnologie AM a diffondersi a livello industriale; tra queste, la prima ad essere commercializzata fu la tecnica nota come selective laser sintering (SLS). Il processo, sviluppato dall'Università di Austin (USA) in collaborazione con la società DTM e dalla società tedesca EOS, viene mostrato in Figura 2, e rappresenta il punto di partenza di tutti gli altri processi PBF, che attuano alcune modiche in una o più parti al fine di migliorarne la produttività o ampliare la gamma di materiali trattabili.

Come viene descritto da Gibson, Rosen e Stucker nel libro "Additive Manufacturing Technologies" [11] tutti i processi a letto di polvere presentano alcune caratteristiche comuni, fondamentali al processo, quali una o più fonti di calore per indurre il processo di fusione tra le polveri, un sistema per controllare la fusione regione per regione in ciascuno strato e un metodo per il deposito dello strato di polvere desiderato. Le principali fonti di calore utilizzate dalle macchine a letto di polvere sono i laser.

Come mostrato in Figura 2, uno strato sottile di polvere polimerica viene depositato al di sopra di una piattaforma e livellato mediante un rullo, che ha il compito di far si che lo strato venga depositato con lo spessore desiderato (tipicamente lo spessore è di 0,075-0,15 mm). Lo strato di polvere che si trova sulla piattaforma di lavoro viene preriscaldato e portato ad una temperatura prossima alla temperatura di fusione (o transizione vetrosa) del materiale. Al di sopra della piattaforma si trovano dei riscaldatori che svolgono il compito di mantenere la giusta temperatura all'interno della camera di lavoro; i riscaldatori sono disposti anche al di sopra del powder feeder in modo da preriscaldare la polvere prima che essa venga depositata. Nelle macchine più recenti, vi sono delle resistenze disposte attorno alla piattaforma di lavoro al fine di riscaldarla. Il mantenimento di una temperatura elevata ed uniforme all'interno della camera di lavoro viene ottenuto nel modo precedentemente descritto al fine di minimizzare i ritiri in fase di solidificazione e le deformazioni causate da espansioni e contrazioni termiche non uniforme, ridurre il più possibile l'energia necessaria al processo di fusione delle polveri (preriscaldando le polveri è infatti richiesta meno potenza da parte del laser).

Dopo aver depositato lo strato di polvere e dopo averlo preriscaldato, un fascio laser CO_2 focalizzato viene indirizzato sul letto di polvere e mosso lungo il piano x-y attraverso Scanning Mirrors, in modo da fondere solo la polvere necessaria alla realizzazione della sezione.

La polvere circostante che non viene fusa funge da supporto per gli strati successivi, e questo, unito alla minimizzazione dei ritiri di solidificazione grazie al preriscaldo della camera di lavoro, fa si che non siano necessari ulteriori supporti; l'SLS è dunque l'unica tecnica basata su polvere che mi permette di saturare completamente l'asse z.

Terminato lo strato, la piattaforma di lavoro si abbassa lungo l'asse z di una quantità pari allo spessore dello strato e il roller deposita e livella un nuovo strato di polvere; il processo prosegue fino al completamento della parte.

L'intero processo di realizzazione della parte avviene all'interno di una camera chiusa e in copertura di azoto, al fine di evitare l'ossidazione della polvere, che altrimenti reagirebbe alle temperature tipiche del processo.

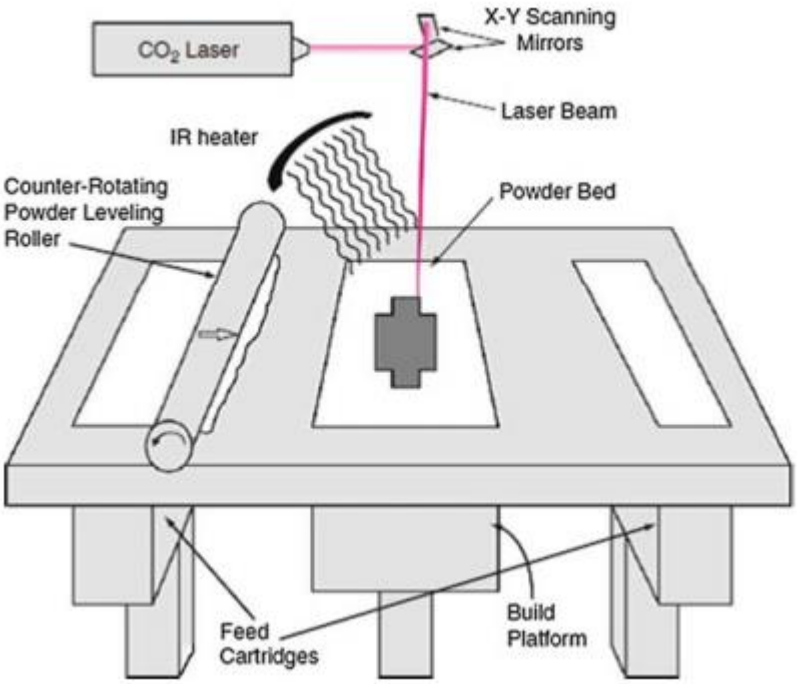


Figura 2 – Schema del processo di selective laser sintering [11]

Al termine del processo il blocco di polvere contenente i pezzi richiede un periodo di raffreddamento in aria per consentire alle parti di raggiungere una temperatura abbastanza bassa da permetterne il maneggiamento. Se i pezzi o la polvere circostante venissero esposti troppo presto alla temperatura ambiente, i pezzi potrebbero deformarsi a causa delle contrazioni termiche e la polvere potrebbe andare in contro all'ossidazione entrando in contatto con l'ossigeno contenuto nell'atmosfera.

Terminato il raffreddamento, le parti possono essere rimosse dal blocco di polvere, la polvere in eccesso viene rimossa dalla parte e, qualora fosse necessario, possono essere eseguite delle operazioni di finitura superficiale. La polvere non trattata, opportunamente setacciata, può essere riutilizzata per un nuovo processo in combinazione con quella vergine.

Il processo di SLS, a seconda del materiale e della quantità di calore apportato, può essere suddiviso in Solid State Sintering (SSS), Liquid phase sintering-partial melting, full melting e legame indotto chimicamente [12]. Nel primo caso il processo termico avviene tra la temperatura di fusione ($T_{Fusione}$) e $\frac{T_{Fusione}}{2}$. Nel Liquid phase sintering-partial melting, l'energia termica apportata è tale da fondere completamente il materiale bassofondente che funge da legante, mentre il materiale avente funzioni strutturali rimane allo stato solido. Per quanto riguarda, invece, la tecnica del full melting, in questo caso la polvere fonde interamente e il componente avrà proprietà paragonabili a quelle dei componenti dello stesso materiale ottenuti per fusione. Quest'ultima tecnica è caratterizzata da un tempo di processo più lungo ed è obbligatorio svolgere il preriscaldo del letto di polvere.

I sistemi a laser di questo tipo in origine erano stati pensati principalmente per la realizzazione di prototipi in materiale plastico; con lo sviluppo delle fonti di calore e dei materiali processabili, è ora possibile realizzare parti con polveri metalliche o ceramiche. Come risultato, le tecnologie a letto di polvere laser hanno subito una grande diffusione in tutto il mondo e dispongono di una vasta gamma di materiali (tra cui anche i compositi) che permettono la realizzazione di pezzi finiti, aventi proprietà elevate e idonee alle applicazioni ingegneristiche.

L'SLS presenta un'elevata produttività nella produzione delle parti; garantisce, inoltre, la possibilità di saturare completamente il volume di lavoro, non necessitando della presenza di supporti, abilitando la possibilità inserire nuovi pezzi anche a job avviato mediante software di Nesting 3D, nonché di modificare o rimuovere pezzi che non sono ancora in lavorazione.

1.2.1 Principali parametri di processo

Prima di poter affrontare la sperimentazione, obiettivo del lavoro di tesi, e la scelta del Design of Experiment, si ritiene necessario presentare quelli che sono i parametri del laser che influenzano la qualità del componente finale, sia in termini visivi che in termini di proprietà meccaniche, e il processo di SLS [13]–[15].

- Potenza del Laser [W]: rappresenta la potenza applicata dal laser durante la scansione delle aree del pezzo in ciascuno strato. Tale parametro, espresso sotto forma di percentuale rispetto alla potenza massima, è legato alla conducibilità termica del materiale da trattare in macchina, e quindi dal tipo di materiale. Durante la scansione la potenza del laser è in genere più bassa per la realizzazione del contour (contorno esterno della geometria da realizzare), rispetto all'interno;
- Velocità di Scansione del Laser [mm/s]: rappresenta la velocità con cui il laser attraversa ciascuna linea di scansione, e quindi a tale valore è strettamente legato il tempo totale di lavorazione; come la potenza, anche la velocità di scansione ha un valore solitamente più basso per il contour rispetto all'hatching;
- Diametro Effettivo del Raggio Laser [mm]: rappresenta il diametro dell'area di polvere che viene effettivamente sinterizzata (D_E), e risulta essere maggiore rispetto al diametro fisico del fascio laser che viene focalizzato sul letto di polvere (d). Il diametro effettivo del fascio laser risulta direttamente legato alla potenza del fascio e inversamente proporzionale alla velocità di scansione; inoltre, poiché questi due parametri possono essere diversi tra il contour esterno e l'hatching, anche il diametro effettivo differirà;

- Hatch Distance (o Scan Spacing) [mm]: indica la distanza tra due linee di scansione successive del laser ed è misurata come la distanza tra il centro di un raggio e il centro del raggio successivo, come mostrato in Figura 3. Il valore assegnato allo Scan Spacing dovrebbe essere inferiore rispetto al diametro effettivo del fascio laser, in modo da garantire un collegamento corretto tra le varie linee di scansione; si può osservare in Figura 4 come se il valore dell'Hatch Distance (h) risulta più grande rispetto al diametro del fascio (d) allora tra le due scannerizzazioni parallele del laser rimane del materiale non sinterizzato, e ciò porta alla formazione di un componente finale poroso con un peso inferiore ma scarse proprietà, mentre se il valore di h è molto inferiore rispetto a d viene apportato nuovamente calore ad una porzione di materiale già interessata precedentemente dal passaggio del laser, con tutte le problematiche ad esso connesse [15];
- Beam Offset [mm]: rappresenta la distanza tra il centro del fascio laser e il bordo del layer, poiché il centro del laser nella fase di scannerizzazione di uno strato interrompe il moto prima del raggiungimento del bordo. Solitamente si predilige un valore di beam offset prossimo alla metà del diametro effettivo del laser per il contour, in modo da evitare che vi sia polvere non sinterizzata correttamente ma allo stesso tempo che non si apporti calore oltre il bordo prestabilito, in quando altrimenti si comprometterebbe l'accuratezza dimensionale del pezzo. È ancora una volta possibile assegnare un valore diverso del parametro per l'hatching, in questo caso assicurandosi che non vi sia polvere non sinterizzata all'interno del contour; tale risultato si ottiene facendo in modo che vi sia una sottile zona di sovrapposizione tra il percorso del contour e l'area di hatching, non eccessivamente estesa per evitare una eccessiva sinterizzazione; [16]
- Layer Thickness [mm]: indica lo spessore dei singoli strati che vengono deposti dalla macchina ed è superiormente limitato dalla profondità di penetrazione del fascio laser che dipende, a sua volta, da numerosi altri parametri come taglia e densità della polvere, densità di energia, grado di compattazione e conducibilità termica del materiale. Il valore di spessore assegnato influisce sulla produttività del processo di sinterizzazione e sulla finitura superficiale; un valore troppo altro comporta una riduzione del tempo di produzione ma anche una intensificazione dell'"effetto scala", caratteristico delle tecniche di Additive Manufacturing, e un

peggioramento dell'accuratezza dimensionale. Il valore del Layer Thickness deve essere tale da permettere al fascio di penetrare e rifondere solo parzialmente lo strato precedente, in modo da assicurare un corretto legame;

- Temperatura della camera;
- Temperatura del letto di polvere

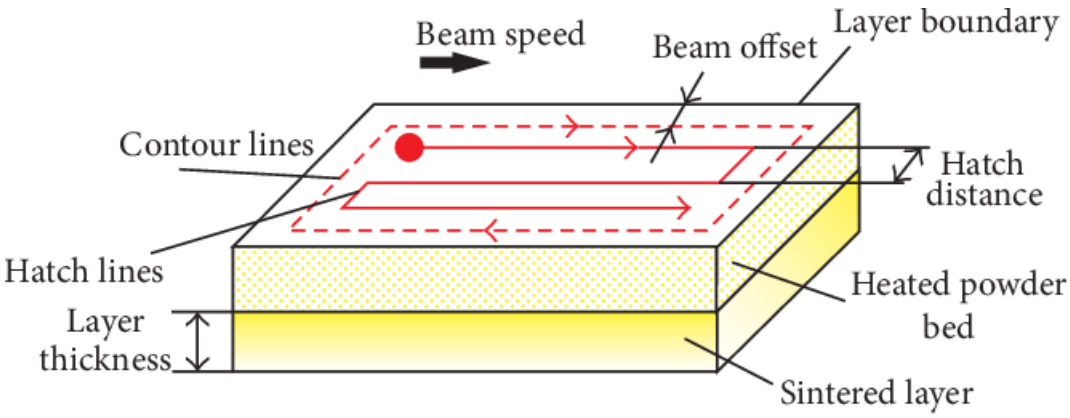


Figura 3 – Rappresentazione Hatch Distance [17]

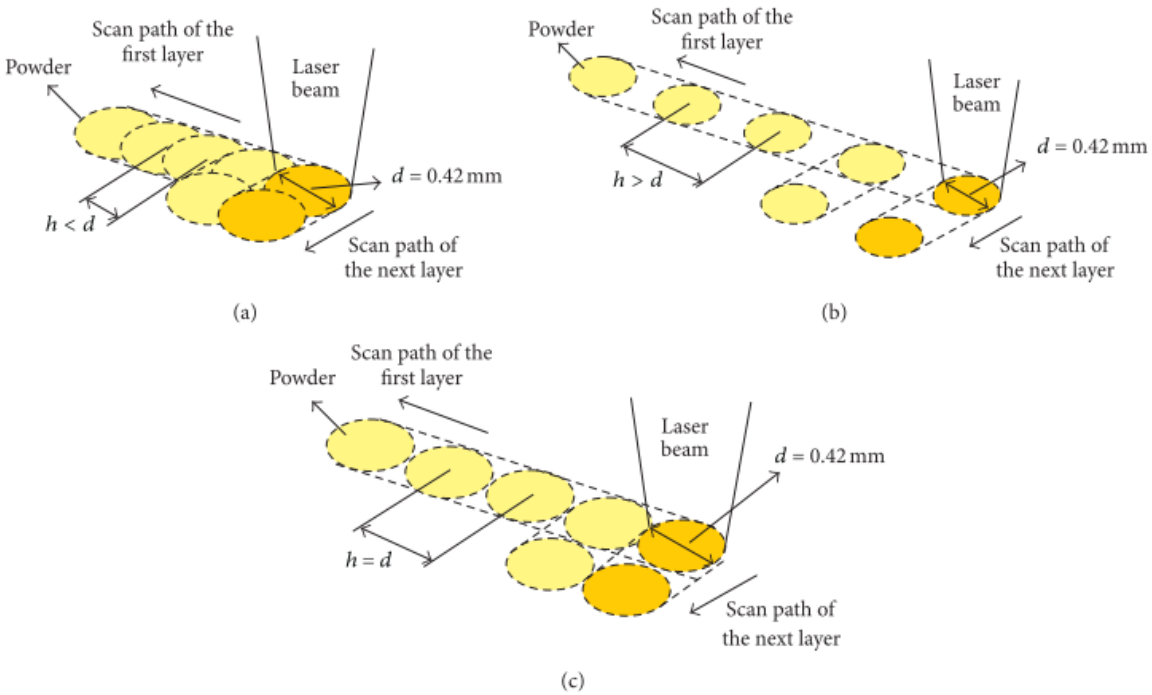


Figura 4 – Percorso di scansione per processo di sinterizzazione: (a) h<d, (b) h>d, (c) h=d [17]

Come espresso nell'elenco, è possibile diversificare i parametri tra il contorno e il riempimento; inoltre, l'ordine tra le due fasi di contour e hatching è legato al materiale da lavorare, con alcuni materiali è conveniente scannerizzare prima il contour (es. PA2200), mentre con altri è conveniente ripassare il contour alla fine per migliorare la qualità della superficie (es. Alumide) [14].

Un ruolo molto importante nella qualità del prodotto finale è, inoltre, svolto dalla strategia di scansione, in quanto una scelta corretta può migliorare notevolmente le proprietà fisiche e meccaniche del pezzo, la sua accuratezza dimensionale, la rugosità superficiale e il tempo di produzione.

Le tecnologie di SLS offrono un discreto numero di strategie di scansione che differiscono in base alla macchina e al produttore; tra le strategie messe a disposizione dalla EOS è possibile utilizzare per esempio contour and hatching, sorted, unsorted, skincore, UpDownskin, edges [18]. Per questa sperimentazione si è utilizzata una strategia del tipo contour and hatching, con direzione di scansione tra i vari strati alternata. Con questo tipo di strategia, per ciascun layer il laser prima riempie internamente il pezzo, e successivamente scansiona il bordo del pezzo (contour); mentre nella fase del contour il fascio segue il contorno scannerizzando semplicemente in una singola passata, nella fase di hatching dell'interno il laser compie un percorso lineare avanti e indietro lungo una direzione perpendicolare [16]. Per l'hatch interno sono disponibili quattro scelte, come mostrato in Figura 5, ossia lungo X, lungo Y, in entrambe le direzioni sullo stesso strato oppure alternate in X e Y, e in quest'ultimo caso la direzione di scansione viene cambiata tra uno strato e il successivo; dunque, ogni due strati si ripeterà la stessa direzione di scansione. A seconda delle proprietà che si vogliono esaltare può essere più determinante scannerizzare lungo X, lungo Y, o alternando le direzioni, in quanto tale scelta ha una influenza molto grande sulle caratteristiche meccaniche del pezzo finale [18].

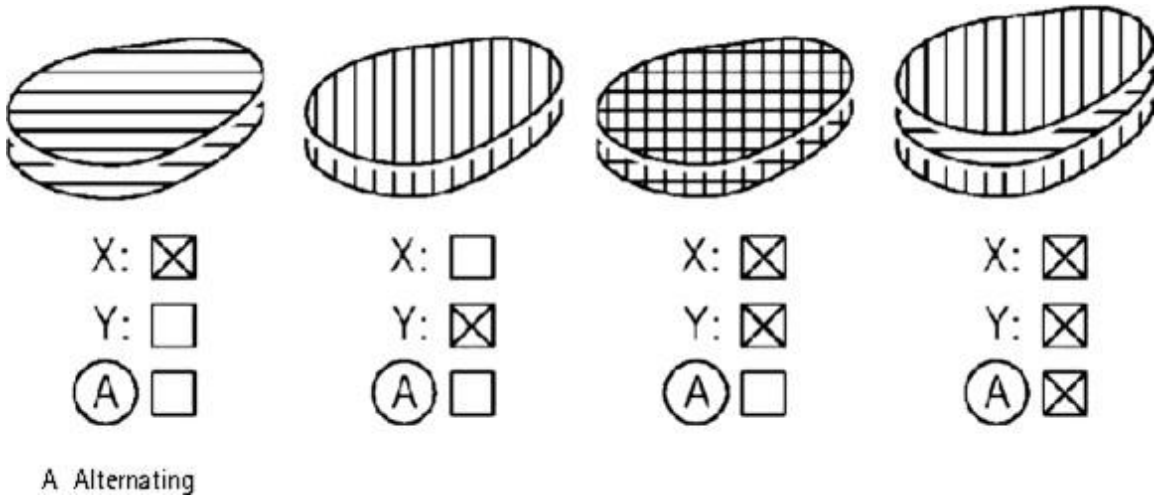


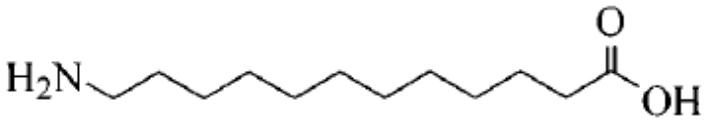
Figura 5 – Pattern di scansione possibili [18]

1.3 Il materiale: PA2200 e Alumide

Sebbene il numero di materiali disponibili per la produzione mediante fabbricazione additiva sia notevolmente cresciuto negli anni, vi è ancora una predilezione per il polimero; tra quelli più utilizzati nell'ambito dell'SLS troviamo il nylon, noto anche come poliammide (PA) [12], termoplastici cristallini o semicristallini come polietilene (PE) [19], PEEK [20] e PCL.

In particolare, le poliammidi sono delle macromolecole caratterizzate dalla presenza del gruppo ammidico CO-NH, che fa si che tali composti abbiano determinate proprietà; tali polimeri si possono sintetizzare mediante polimerizzazione per condensazione di un acido dicarbossilico e di una diammina o tramite polimerizzazione per apertura d'anello di un lattame [21].

All'interno della famiglia delle poliammidi alifatiche possiamo identificare numerosi polimeri noti con il nome commerciale di nylon, come il nylon 12. Quest'ultimo, la cui struttura è mostrata in Figura 6, risulta essere un efficace isolante elettrico ed è meno sensibile all'umidità se confrontato con altre poliammidi, inoltre presenta una buona resilienza e resistenza ad agenti chimici.



Aminolauric Acid

Figura 6 – Struttura del PA 12 [22]

La poliammide 12, sotto forma di polvere, è il materiale maggiormente analizzato per la fabbricazione additiva disponibile sul mercato; dagli studi svolti in letteratura è noto come le parti realizzate con il nylon 12 risultino essere robuste e stabili anche per un discreto periodo di tempo, presentano una estrema versatilità. I pezzi composti da questo polimero rappresentano delle valide alternative a quelli ottenuti per injection molding con ABS per quanto riguarda la resistenza e la flessibilità; sotto il profilo delle proprietà delle parti ottenute con PA12 tali componenti risultano essere caratterizzati da resistenza e rigidezza in linea con i principali polimeri disponibili, biocompatibilità e sono certificati per il contatto con gli alimenti. Con riferimento alle polveri della società tedesca della EOS in Tabella 1 vengono riportate le loro proprietà.

Tabella 1 – Proprietà polveri PA 2200 [23]

PROPRIETÀ MECCANICHE TIPICHE		
Modulo elastico	1700 [MPa]	ISO 527
Resistenza a trazione	50 [MPa]	ISO 527
Allungamento a rottura	20%	ISO 527
PROPRIETÀ TERMICHE		
Temperatura di fusione (20°C/min)	176 [°C]	ISO 11357-1/-3
Temperatura di deviazione del calore (1.80 MPa)	70 [°C]	ISO 75-1/-2
Temperatura di deviazione del calore (0.65 MPa)	154 [°C]	ISO 75-1/-2
Temperatura di rammollimento Vicat (50°C/h 50N)	163 [°C]	ISO 306
PROPRIETÀ FISICHE		
Densità	930 [Kg/m^3]	Metodo EOS

Sebbene le proprietà del Nylon 12 siano in linea con quelle degli altri polimeri, il mercato risulta essere particolarmente interessato a materiali aventi proprietà migliori ma un peso ridotto al minimo; a tal proposito risulta importante lo sviluppo di materiali compositi.

Con il termine "materiale composito" si fa riferimento all'unione di due o più materiali diversi per ottenerne un terzo. A differenza delle leghe, dove i materiali differenti sono combinati microscopicamente e non distinguibili dall'esterno, nel caso dei compositi è possibile distinguerli macroscopicamente.

L'utilizzo dei materiali compositi è dovuto alla loro caratteristica di mostrare, se realizzati nel modo opportuno, le migliori proprietà dei costituenti. Tra le qualità che si vogliono esaltare mediante la realizzazione di un materiale composito troviamo peso, forza, rigidezza, conduttività termica (o isolamento termico) e resistenza agli agenti chimici; è evidente come migliorare contemporaneamente tutte queste proprietà sia impossibile, ne

consegue che il composito è sviluppato per incrementare le caratteristiche che sono essenziali per l'obiettivo imposto.

Come Robert M. Jones spiega nel suo libro "Mechanics Of Composite Materials" [24], i materiali compositi possono essere suddivisi in quattro tipologie:

- Fibrous composite materials, caratterizzati da fibre all'interno di una matrice,
- Laminated composite materials, caratterizzati da più strati dei diversi materiali, sovrapposti;
- Particulate composite materials, composti da particelle in una matrice;
- Una combinazione di alcune o tutte e tre le precedenti tipologie.

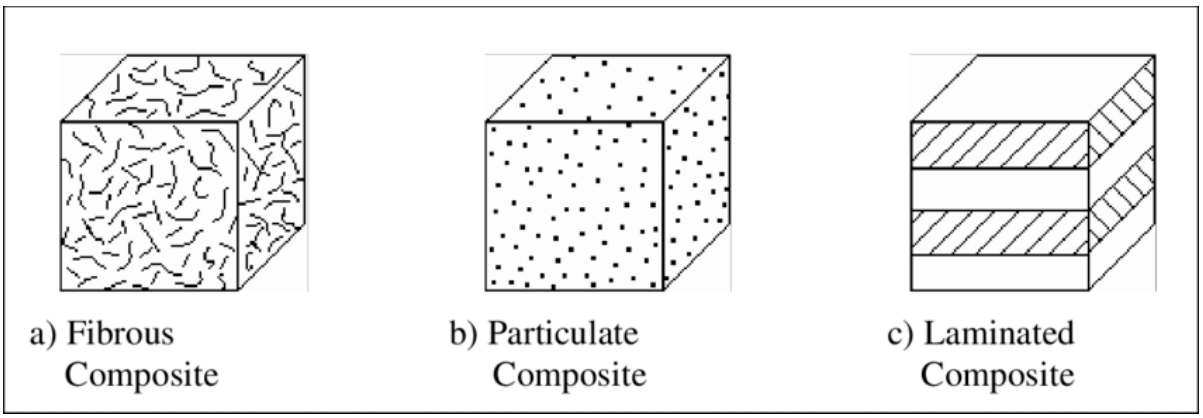


Figura 7 – Tipologie di materiali compositi [25]

La prima tipologia di compositi è contraddistinta da una matrice di materiale a bassa densità, forza e rigidezza, che lega fra di loro delle fibre lunghe o dei whiskers contenuti all'interno. Lo scopo della matrice è quello di fungere da sostegno delle fibre o dei whiskers, oltre che di proteggerle, e può essere composta da materiali polimerici, metallici, ceramici o da Carbonio.

Fibre e whiskers sono invece gli elementi del composito che permettono di ottenere un materiale finale rigido e resistente, ma con una densità molto bassa; questo perché le fibre lunghe di determinati materiali presentano, in virtù di una struttura con cristalli allineati alla direzione della fibra e di un minor numero di difetti, una maggiore rigidezza rispetto allo stesso materiale allo stato massivo. Un whisker presenta una struttura molto simile a quella

di una fibra, ma con una lunghezza minore, che permette di avere proprietà ancora più elevate.

Per quanto riguarda i materiali compositi laminati essi sono formati da delle lamine di differenti materiali incollate insieme, al fine di ottenere un nuovo materiale con caratteristiche migliori per quanto riguarda rigidezza, forza e leggerezza. Questa tipologia di compositi può essere suddivisa in sottocategorie:

- Bimetallici, in cui vengono unite tra loro due lamine di differenti metalli avente un diverso coefficiente di espansione termica;
- Metalli rivestiti, in cui un materiale metallico viene rivestito con un altro per esaltare le proprietà di entrambi i componenti (ad esempio i fili di Alluminio e Rame della rete elettrica);
- Vetro laminato, caso particolare del vetro in ambito automotive in cui abbiamo due lamine di vetro che proteggono una lamina di materiale plastico dai graffi, conferendo rigidezza al composito, mentre il materiale plastico interposto conferisce la resistenza necessaria per l'applicazione;
- Laminati a base plastica
- Laminated Fibrous composites, sono una particolare classe di compositi costituiti dalla combinazione di compositi a fibre e della tecnica di laminazione, in cui si incollano tra loro dei layer di materiale rinforzato mediante fibre di un altro materiale, solitamente variando la direzione delle fibre per ottenere differenti valori di rigidezza in ciascuna delle direzioni o orientandole in modo da ottenere appositi valori delle proprietà precedentemente citate.

I Particulate Composites si compongono di particelle di un determinato materiale sospese all'interno di una matrice di un altro materiale [25]. Con il termine "particelle" si fa riferimento a dei rinforzanti che non hanno le caratteristiche di "fibra", essendo privi di una lunghezza significativa.

Particelle rinforzanti, come anche le matrici, possono essere metalliche e non metalliche, per cui è possibile avere quattro possibili combinazioni: particelle metalliche in matrice non metallica (come l'Alumide), particelle metalliche in matrice anch'essa metallica, particelle non metalliche in matrice non metallica e particelle non metalliche in matrice metallica.

I compositi particellari sono considerati isotropi, in quanto la distribuzione delle particelle all'interno della matrice avviene in maniera randomica; inoltre, le proprietà del composito variano a seconda delle dimensioni delle particelle di rinforzante distribuite nella matrice. A tal proposito, le particelle influiscono positivamente sulla rigidezza del componente, mentre generalmente hanno un'influenza ridotta sulla resistenza a frattura e sul rafforzamento del composito. Usate per ridurre i costi del materiale composito, questa tipologia di materiali trova grosse applicazioni nell'ambito dell'Additive Manufacturing.

Infine, diversi materiali compositi multifase presentano caratteristiche appartenenti a diverse delle classi viste in precedenza.

Nell'ambito della fabbricazione additiva, sono stati fatti dei tentativi per migliorare le caratteristiche meccaniche e fisiche di componenti polimerici stampati mediante le tecnologie di selective laser sintering (SLS). In letteratura è possibile trovare diversi tentativi finalizzati al miglioramento delle proprietà meccaniche e/o fisiche di componenti realizzati in materiale polimerico mediante tecniche di fabbricazione additiva a laser rinforzandoli con cariche inorganiche di piccole dimensioni, in particolare polvere di vetro [26] [27], carburo di silicio [28] [29], polvere di alluminio [3], talvolta addirittura su scala nanometrica [30] come nanosilicio [31] e nano-Al2O3 [32]. Tra i compositi a matrice polimerica più diffusi a livello commerciale troviamo la poliammide caricata con fibre di vetro (DuraForm® GF, PA3200 GF) e la poliammide caricata con alluminio (Alumide®).

I due materiali che sono stati usati nella realizzazione di questo progetto di tesi sono state due polveri acquistate dalla società tedesca della EOS: la poliammide PA2200 e l'Alumide.

Sulla base della PA12, la polvere di PA2200, come detto in precedenza, presenta buone prestazioni in termini di forza e rigidezza, resistenza agli agenti chimici, un ottimo livello di dettaglio e la biocompatibilità. Le proprietà meccaniche del componente finale, così come il processo produttivo, dipendono fortemente dalle proprietà generali e termiche della polvere di PA2200. Tali proprietà sono, per esempio, una dimensione media dei grani pari a 56 μm, una densità apparente pari a 0,45 g/cm^3, una temperatura di fusione compresa tra 172 °C e 180 °C. [5]

La polvere di Alumide è invece il risultato di una miscelazione meccanica e omogenea di particelle di poliammide 12 e alluminio. I componenti ottenuti mediante un processo di sinterizzazione di tali polveri presentano un aspetto granulare ad una prima analisi visiva,

una parvenza metallica e una rigidezza più elevata rispetto alla classica poliammide; possono essere lavorati con semplicità tramite fresatura o molatura, e inoltre possono andare in contro a processi come lucidatura o realizzazione di rivestimenti.

Da un confronto tra l'Alumide e la PA2200 possiamo ancora dire che il composito presenta atri vantaggi: ottima precisione geometrica della parte, un corretto bilanciamento tra densità e rigidezza, migliore conducibilità termica, migliore macinabilità e una resistenza a flessione accettabile [33].

Per quanto riguarda le proprietà generali e termiche, tali informazioni possono essere estrapolate dal sito della società EOS [34] e le principali sono riassunte in Tabella 2.

Tabella 2 – Proprietà polveri Alumide [34]

PROPRIETÀ MECCANICHE TIPICHE		
Modulo elastico	3800 [MPa]	ISO 527
Resistenza a trazione	48 [MPa]	ISO 527
Allungamento a rottura	4%	ISO 527
PROPRIETÀ TERMICHE		
Temperatura di fusione (20°C/min)	176 [°C]	ISO 11357-1/-3
Temperatura di deviazione del calore (1.80 MPa)	144 [°C]	ISO 75-1/-2
Temperatura di deviazione del calore (0.45 MPa)	175 [°C]	ISO 75-1/-2
Temperatura di rammollimento Vicat (50°C/h 50N)	169 [°C]	ISO 306
PROPRIETÀ FISICHE		
Densità	930 [Kg/m^3]	Metodo EOS

1.4 Campi di applicazione

I settori che mostrano interesse per le tecnologie dell'Additive Manufacturing sono molteplici, sia in campi prettamente scientifici sia per applicazioni più artistiche:

- Automotive e aerospaziale, dove sono richieste determinate prestazioni meccaniche ma da parte di componenti aventi il peso più basso possibile;
- Biomedicale e odontoiatrico, dove la biocompatibiltà di certi materiali permette la realizzazione di protesi su misura;
- Tooling, dove la possibilità di produrre componenti "custom on demand" senza la necessità di fare magazzino rende l'additive manufacturing la soluzione migliore per la realizzazione di tool dedicati a lavorazioni particolari e assemblaggi in breve tempo;
- Moda e gioielleria

Il progresso scientifico ha reso possibile la realizzazione di componenti finiti, anche dalla geometria complessa, interamente realizzati mediante fabbricazione additiva; in tutto ciò la fabbricazione additiva permette l'integrazione più funzioni, realizzando il pezzo in un solo step produttivo, e la personalizzazione delle proprietà meccaniche a seconda dell'ambito di utilizzo. L'Additive ha anche permesso lo sviluppo di canali integrati per gli stampi, abilitando il "conformal cooling".

Nonostante la diffusione su larga scala delle tecnologie di fabbricazione additiva, sia sul polimero che sul metallo, l'applicazione principale resta, ad oggi, la realizzazione di prototipi, siano essi concettuali, funzionali o di preserie. A tal proposito la poliammide, essendo una polvere molto fine e autoportante (non necessita di strutture di supporto), permette di ottenere dei componenti funzionali di altissima qualità, con un'ottima risoluzione e rispetto del dettaglio, come mostrato in Figura 8.

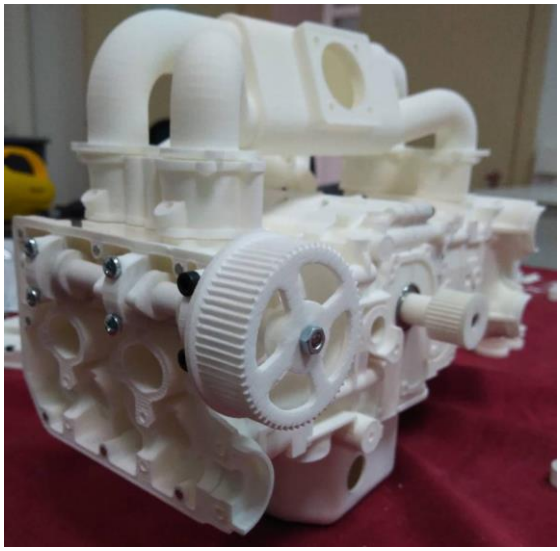


Figura 8 – Modello motore Subaru WRX EJ20 boxer in poliammide [35]

Per quanto riguarda l'Alumide, le proprietà del composito non sono tali da renderne possibile un utilizzo in componenti che, in esercizio, sopportano carichi strutturali elevati; tuttavia, la presenza dell'alluminio aumenta la rigidezza del materiale e attribuisce alla parte una parvenza metallica. L'incremento di rigidezza fa si che il materiale sia di particolare interesse nel settore del tooling; a tal proposito nell'azienda Prosilas [36] sono state realizzate guide di montaggio utili al centraggio e foratura su parti meccaniche in poliammide caricata con alluminio (Figura 9).

Figura 9 – Dime di montaggio realizzate in Alumide [36]

Combrinck [37] ha analizzato un'applicazione particolarmente interessante per componenti in Alumide ottenuti per sinterizzazione laser, indagando su un possibile utilizzo per la produzione di inserti di attrezzaggio rapido per processi di injection moulding. Nella sua analisi Combrinck ha realizzato degli inserti in Alumide per svolgere delle prove di stampaggio ad iniezione al fine di determinarne la durata; sono state prodotte parti in Polipropilene e ABS, con usura minima degli inserti, e parti in Policarbonato e Poliammide 6, con un'usura più significativa fin dai primi cicli di stampaggio a iniezione, concludendo che con materiali polimerici simili, in termini di parametri, a PP e ABS è possibile utilizzare gli inserti in Alumide per il processo di injection moulding. Confrontando inserti realizzati con materiali e tecnologie differenti, è risultato che i più convenienti per realizzare un numero limitato di componenti stampati ad iniezione in plastica sono proprio gli inserti in Alumide.

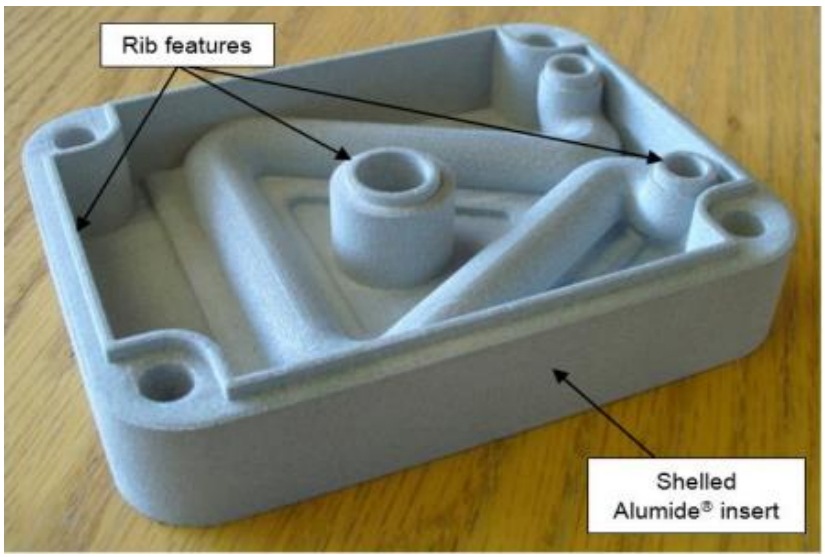


Figura 10 – Inserti in Alumide [37]

Capitolo 2: Studio dell'influenza dei parametri per la PA2200

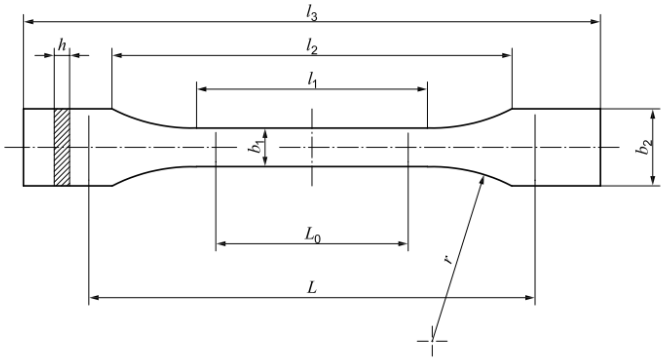
Si procede ora con la descrizione delle attività sperimentali sviluppate nell'ambito di questa tesi, a cominciare dal lavoro svolto sulla poliammide al fine di prendere confidenza con la macchina, capire l'influenza che i vari parametri hanno sulla qualità del componente finale e avere un modello di confronto a livello macroscopico per il successivo lavoro sull'Alumide.

2.1 Preparazione provini

La realizzazione di parti mediante le tecniche di AM necessita della disponibilità di un modello matematico realizzato mediante un sistema CAD che rappresenta la geometria del componente, per cui il primo passo è stato l'utilizzo del software Solidworks 2020 per riprodurre i provini di trazione e flessione che si desidera produrre.

In questo studio i provini di trazione sono stati realizzati secondo la normativa EN ISO 527-2:2019, provini di tipologia 1a [38], le cui caratteristiche geometriche sono mostrate in Tabella 3.

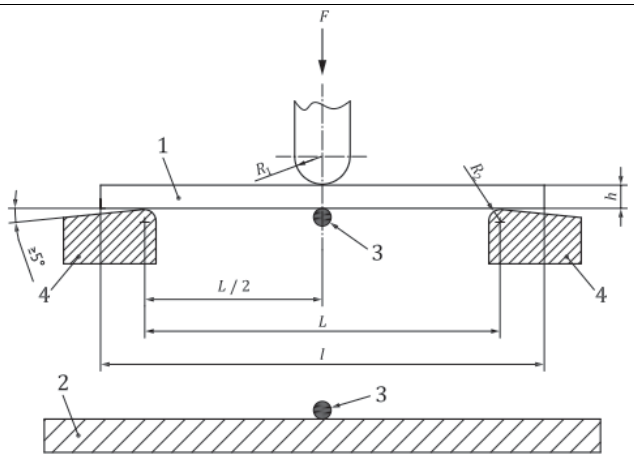
Tabella 3 – Geometria dei provini di trazione (EN ISO 527-2:2019): specimen type 1a [38]



l_3	Overall length [mm]	170
l_1	Length of narrow parallel-sided portion [mm]	80 ± 2
r	Radius [mm]	24 ± 1
l_2	Distance between broad parallel-sided portions [mm]	109.3 ± 3.2
b_2	Width at ends [mm]	20.0 ± 0.2
b_1	Width at narrow portion [mm]	10.0 ± 0.2
h	Thickness [mm]	4.0 ± 0.2
L_0	Gauge length [mm]	75.0 ± 0.5
L	Initial distance between grips [mm]	115 ± 1

Per quanto riguarda, invece, i provini per il test di flessione su tre punti, essi sono stati realizzati seguendo la normativa UNI EN ISO 178:2019 [39], le specifiche geometriche del provino sono mostrate in Tabella 4.

Tabella 4 – Geometria dei provini di flessione su 3 punti (UNI EN ISO 178:2019) [39]



Key

1	test specimen	h	thickness of specimen
2	support base plate	F	applied force
3	deflectometer position	l	length of specimen
4	supports	L	length of span between supports
R_1	radius of loading edge	R_2	radius of supports

l	Length [mm]	80 ± 2
b	Width [mm]	10.0 ± 0.2
h	Thickness [mm]	4.0 ± 0.2
L	Length of span between supports [mm]	(16 ± 1)h

Per ricercare una corretta disposizione dei vari provini all'interno della macchina, si è realizzato un assieme che rappresentasse le dimensioni del volume di lavoro della macchina su Solidworks; all'interno dell'assieme si è poi proceduto ad inserire i vari provini, studiandone il posizionamento. Le distanze minime usate tra i provini e le pareti della macchina, così come la distanza minima tra i provini, sono state stabilite sulla base di lavori presenti in letteratura [6] e il loro valore è:

- Distanza minima tra i provini e le pareti laterali = 10 mm
- Distanza tra il primo strato di provini e la base = 5 mm
- Distanza minima tra i provini sul piano x-y = 10 mm
- Distanza minima tra i provini lungo l'asse z = 5 mm

I provini di trazione sono stati disposti in modo tale da orientare il lato lungo secondo l'asse x, i provini per lo studio della flessione su 3 punti, invece, sono stati disposti secondo due modalità: Edge e Flat, come mostrato in Figura 11.

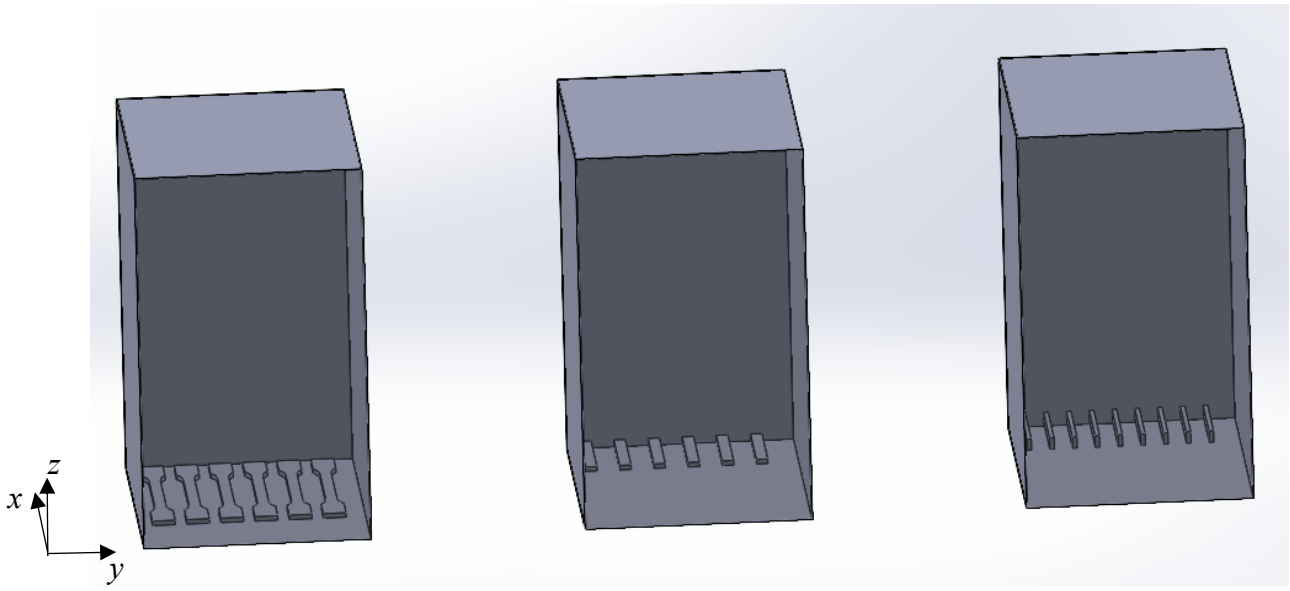


Figura 11 – Orientazione provini in machina

Nel posizionare i provini lungo l'asse z si è prestato particolare attenzione all'evitare la presenza di strati di deposizione in cui il laser non è in azione, in quanto altrimenti la presenza di uno strato di polvere fredda rispetto al successivo strato caldo andrebbe ad alterare la dispersione del calore e la qualità del provino.

Una volta definito il posizionamento di tutti i provini, il file è stato salvato in formato STL.

Successivamente i provini sono stati inseriti nell'ambiente virtuale della macchina utilizzando il software Materialise Magics 21.11.

Al fine di poter distinguere tra di loro i provini al termine del job, si è proceduto all'inserimento su ciascuno di essi di un Label con un codice identificativo contenente la posizione e la coppia di parametri associati, rappresentati con due cifre l'uno (il valore di velocità diviso per 100, quello dell'Hatch Distance moltiplicato per 100). Il risultato finale è mostrato nella Figura 12 e nella Figura 13.

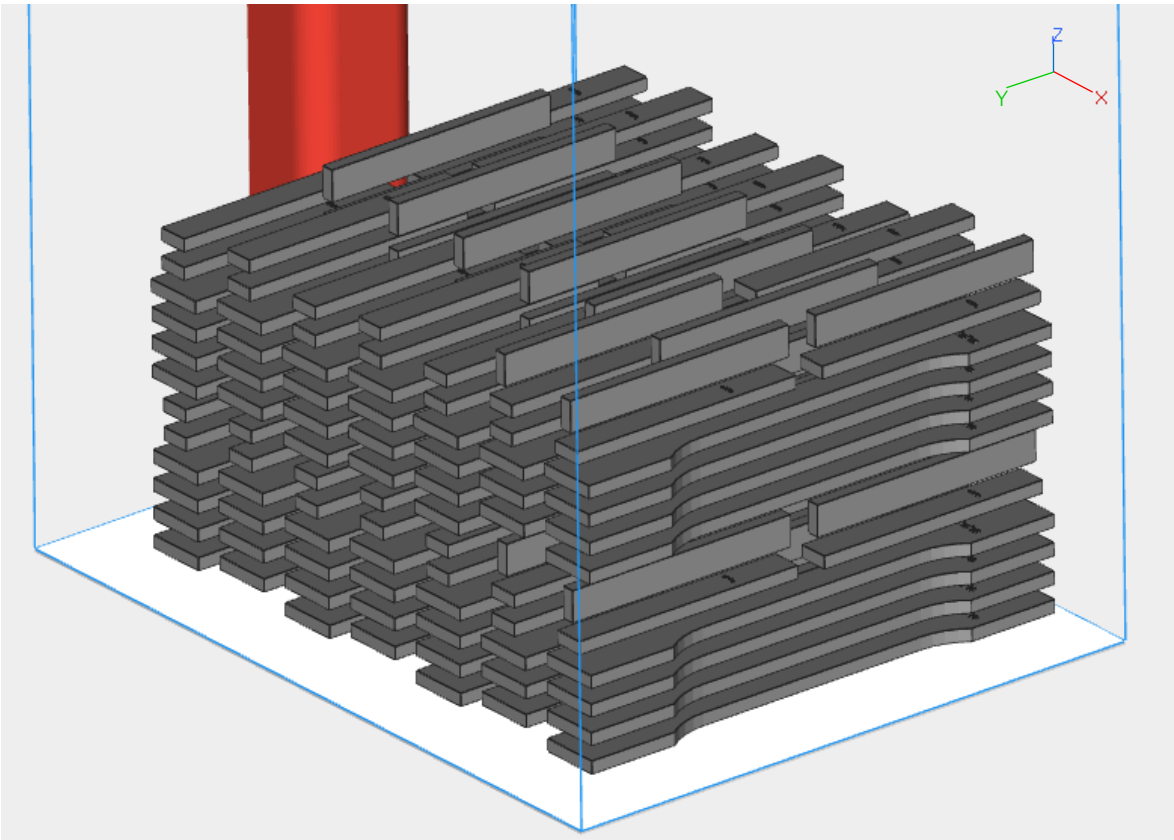


Figura 12 – Disposizione provini su Magics

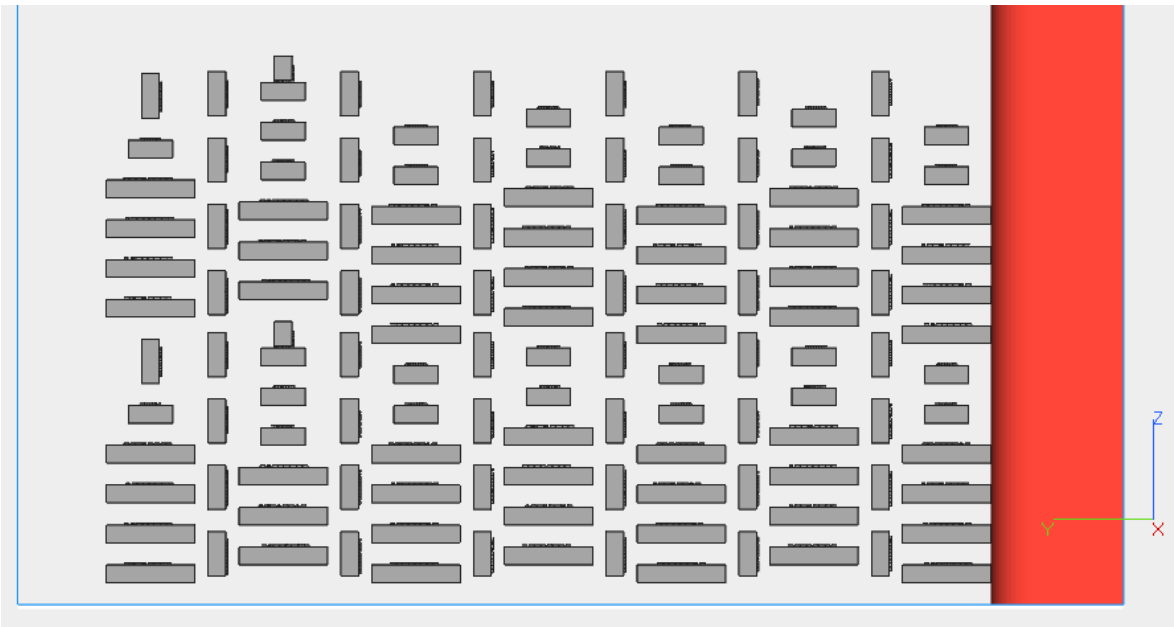


Figura 13 – Disposizione provini su Magics (vista frontale y-z)

2.2 Realizzazione del DoE

Al fine di determinare l'effetto dei singoli parametri nel processo di SLS per un materiale largamente studiato come la PA2200 si è adoperato un Full-Factorial Design of Experiment (DoE), metodologia che permette di condurre delle attività sperimentali finalizzate a identificare l'influenza di un certo set di parametri di processo sulla qualità della parte finale, estrapolando il maggior numero di informazioni ma svolgendo il numero più basso possibile di test. I parametri di ottimo rappresentano quei valori delle variabili (Fattori) che permettono di ottenere parti aventi caratteristiche prossime a quelle ideali per il processo di selective laser sintering. Una parte ideale prodotta mediante SLS viene identificata come completamente densa nelle zone dove è presente materiale, accurata a livello dimensionale e rimovibile dalla "powder cake" senza particolari problemi [40].

Tra i possibili parametri che è possibile variare in un processo di SLS, esposti in precedenza, si è scelto di attuare, facendo riferimento alle esperienze presenti in letteratura, un DoE a due fattori: velocità di scansione del laser (v), Hatch Distance (Hd). A ciascun fattore sono stati assegnati tre valori (Livelli), in un intorno dei parametri utilizzati da Stoia et al. [7], e per ogni coppia di parametri sono state realizzate 6 repliche; inoltre, come valore di potenza, si è scelto di utilizzare il valore più alto inseribile, pari a 25 W. La temperatura della camera di lavoro è stata fissata a 168 °C, mentre la temperatura del letto di polvere è stata impostata a 150 °C. I parametri utilizzati vengono mostrati in Tabella 5.

Tabella 5 – Parametri DoE PA2200

P [W]	v [mm/s]	Hd [mm]	t [mm]	T_1 [°C]	T_2 [°C]
25	1500-2000-2500	0,15-0,25-0,35	0,1	168	150

La macchina utilizzata per la stampa dei provini è la EOS Formiga P110 Velocis, mostrata in Figura 14 [41]. Questa macchina dispone di un laser CO_2 da 30W e un volume della camera di lavoro pari a 200 mm x 250 mm x 330 mm; bisogna, tuttavia, prendere in considerazione il fatto che il volume effettivamente utilizzabile per la disposizione dei componenti in macchina risulterà inferiore per la presenza della termocoppia e per via del

fatto che bisogna necessariamente tenere conto del fattore di scala. Alcuni studi [42] hanno individuato un fattore di scala per la PA12 pari al 3,2% lungo gli assi X e Y, mentre lungo l'asse Z da 0 a 300 mm varia da 2,2 a 0. La polvere utilizzata per la realizzazione del job, secondo i dettami forniti dal fornitore EOS, era composta per il 50% da polvere vergine e per la restante parte da polvere riciclata.

Il Factsheet della macchina è presentato in Tabella 6.

Si è proceduto al caricamento del job in macchina e all'assegnazione dei parametri per ciascun provino mediante i software della EOS: RP Tools e PSW. Il primo software effettua lo slicing e converte i file nel formato leggibile dalla macchina (.sli); PSW permette, invece, di disporre i componenti in macchina e di assegnare a ciascuno i parametri desiderati.

Figura 14 – EOS Formiga P110 Velocis [41]

Tabella 6 – Factsheet EOS Formiga P110 Velocis [41]

Technical Data FORMIGA P 110 Velocis	
Building volume	200 x 250 x 330 mm (7.9 x 9.8 x 13 in)
Laser type	CO_2; 30 W
Building rate	up to 1.2 l/h
Layer thickness (depending on material)	0.06 – 0.10 – 0.12 mm (0.0024 - 0.0039 - 0.0047 in)
Precision optics	F-theta lens, high-speed scanner
Scan speed during build process	up to 5 m/s (16.4 ft/s)
Power supply	16 A
Power consumption	typical 3 kW, maximum 5 kW
Dimensions (W x D x H)	1,320 x 1,067 x 2,204 mm (51.97 x 42.01 x 86.77 in)
Recommended installation space	min. 3.2 x 3.5 x 3.0 m (126 x 138 x 118 in)
Weight	approx. 600 kg (1.323 lb)

Software

EOS ParameterEditor, EOS RP Tools, PSW 3.6

Materials

Alumide®, PA 1101, PA 1102 black, PA 2200®, PA 2201, PA 3200 GF, PrimeCast® 101, PrimePart®ST, PA 2105

Optional Accessories

Mixing station, unpacking and sieving station, blasting cabinet

Il processo di realizzazione delle parti è altamente automatizzato e svolto dalla macchina senza necessità di supervisione, se non per le prime ore, al fine di verificare che non vi siano errori nel file, che il materiale sia sufficiente e che non vi siano problemi nella stampa.

2.3 Secondo Job: Cubetti

2.3.1 Energy Density

Il primo job è stato interrotto prematuramente in quanto, in corrispondenza di certi provini, il calore generato durante la stampa risultava essere eccessivo. I provini già realizzati sono comunque stati rimossi dalla “powder cake” e ripuliti dalla polvere residua, in modo da poter essere sottoposti ad un’attenta analisi visiva finalizzata alla comprensione delle

possibili cause. In Figura 15 è possibile osservare uno dei provini che ha causato dei problemi durante la stampa.

Figura 15 – Deformazioni geometriche provini primo job

Si può osservare immediatamente una distorsione geometrica nella parte inferiore del provino, con un grosso quantitativo di polvere in eccesso sinterizzata e agglomerata al provino, nonché sui bordi laterali. La causa è da ricercare nel quantitativo di calore apportato alla materiale durante il processo; la polvere di poliammide, avendo il polimero un basso valore di conducibilità termica (intorno a $0{,}3\ \frac{W}{mK}$), trattiene il calore che viene ceduto ad essa dal laser, comportandosi per l'appunto come un isolante, evitando che esso si propaghi notevolmente sulle zone vicine. Al contrario, il calore tenderà a diffondersi verso il basso, andando nella direzione degli strati precedentemente realizzati e che ormai si trovano a temperature più basse. Questa situazione ha comportato, in alcuni casi, la sinterizzazione della polvere compresa tra provini di strati differenti, che al momento della rimozione dalla "powder cake" sono risultati uniti.

Si è potuto inoltre constatare come ciò sia avvenuto nel caso di provini aventi determinate combinazioni di parametri, caratterizzate da una velocità di scansione più lenta e un valore di Hatch Distance basso.

Dall'osservazione di questo primo Job si è compreso come non è sufficiente prendere in considerazione esclusivamente i singoli parametri di processo, ma è necessario considerare anche la loro interazione. In particolare, in un processo come quello di selective laser sintering, riveste un'importanza fondamentale un parametro denominato Energy Density (ED). Tale grandezza, espressa in $\frac{J}{mm^2}$ risulta essere direttamente proporzionale alla potenza del laser e inversamente proporzionale alla velocità di scansione e all'Hatch Distance, ed è inoltre legata al diametro del fascio laser focalizzato, come mostrato dall'equazione sottostante [43]:

$$ED = \frac{P}{v*h} * x \tag{1}$$

Dove x è definito Beam Overlay Ratio:

$$x = \frac{d}{h} \tag{2}$$

Caulfield et al. [44], analizzando l'influenza che una variazione dell'energy density ha sulle proprietà fisiche e meccaniche di provini realizzati in poliammide mediante processo SLS sfruttando la DTM Sinterstation 2500plus, hanno osservato come le parti realizzate con bassi valori di ED risultavano essere porose, anisotrope e presentavano scarse proprietà meccaniche, ma che queste proprietà miglioravano al crescere dell'ED. Hanno, dunque, stabilito che non bisognerebbe produrre delle parti utilizzando dei parametri tali da ottenere un valore di ED inferiore a $0{,}012\ \frac{J}{mm^2}$.

Pilipović et al. [43] [15] hanno effettuato uno studio finalizzato ad individuare l'influenza che i parametri di un processo di SLS hanno sulle proprietà del componente finale prodotto in PA2200, stabilendo come dei pezzi prodotti con parametri differenti ma stesso valore di energy density manifestano le stesse proprietà. Inoltre, hanno stabilito come, incrementando l'ED, le proprietà meccaniche crescono di conseguenza fino al raggiungimento di un valore di energia tale per cui si produce un surriscaldamento del materiale; in questo modo, hanno stabilito come il valore ottimale di energy density per la realizzazione di parti con la EOS

Formiga P100 sia pari a $0{,}05\ \frac{J}{mm^2}$. In questo modo hanno determinato come, per un valore di layer thickness pari a 0,1 mm, per ottenere proprietà meccaniche soddisfacenti sia possibile utilizzare un range di ED compreso tra $0{,}03\ \frac{J}{mm^2}$ e $0{,}07\ \frac{J}{mm^2}$; infine hanno studiato come un aumento del layer thickness comporti un grosso aumento della densità di energia necessaria per ottenere proprietà accettabili; quindi, è preferibile mantenere un valore di spessore dello strato più basso possibile.

Analizzando la variazione delle proprietà meccaniche e delle grandezze geometriche al variare di due grandezze caratteristiche, energy density e angolo di orientazione (OA), Stoia et al. [8] hanno fatto notare come, mentre l'OA influenzi poco le grandezze geometriche, lo stesso non può dirsi per l'ED; inoltre hanno fatto notare come la dimensione della curing zone, ossia l'area nei pressi dello spot del laser, che sicuramente sarà maggiore del diametro del fascio laser, vari a seconda del valore prescelto di energy density, essendo legata ai parametri di processo come la potenza e la velocità di scansione. Questo comporta che un valore troppo elevato di ED è causa della formazione di componenti aventi dimensioni discostanti da quelle nominali e una geometria curva sui bordi, causata dalla polvere sinterizzata lateralmente che permane poi al termine della lavorazione.

Possiamo quindi affermare che un valore maggiore di energy density permette di avere un processo in cui è possibile avere una migliore fusione delle particelle del polimero, ottenendo strutture più compatte e meno porose, con proprietà migliori; tuttavia, quando tale valore supera un certo range diventando troppo alto avviene la degradazione del polimero, che comporta un drastico calo delle proprietà e un aumento della porosità. Inoltre, un livello troppo basso di ED comporta la realizzazione di parti aventi scarse proprietà meccaniche e una elevata porosità dovuta alla scarsa coesione tra le particelle.

Sulla base di queste considerazioni si è deciso di realizzare un nuovo DoE per produrre un secondo Job, sempre utilizzando come materiale la PA2200, composto da cubetti disposti sulla stessa altezza. Si è proceduto a strutturare un Full-Factorial Design of Experiment (DoE) con tre variabili: potenza del laser (2 livelli), velocità di scansione del fascio (3 livelli) e hatch distance (4 livelli). In questo caso si è deciso di realizzare una sola ripetizione per ciascuna combinazione di parametri, poiché i cubetti non dovranno essere testati con prove distruttive.

Si è, inoltre, aggiunto un ulteriore cubetto avente un valore di velocità di scansione più alto rispetto a quelli fissati in precedenza, per testarne la fattibilità in relazione agli altri parametri inseriti; il totale di pezzi da stampare per questo secondo Job è quindi di 25 cubetti.

Il DoE è stato costruito utilizzando l'Energy Density come parametro di controllo, valutando per le varie combinazioni di parametri che il valore in esame fosse compreso tra $0{,}03\ \frac{J}{mm^2}$ e $0{,}09\ \frac{J}{mm^2}$ (range incrementato superiormente in modo da verificare l'effettiva impossibilità di spingersi oltre i valori individuati dalla letteratura per altre macchine). Dopo aver fissato due valori di potenza (21 W rappresenta il valore dei parametri di default forniti dalla EOS) si è deciso di incrementare la velocità di $150\ \frac{mm}{s}$ e l'hatch distance di 0,03 mm in quanto l'influenza di quest'ultimo parametro sulla densità di energia è maggiore, poiché si trova anche al denominatore del Beam Overlay Ratio. Il DoE è contenuto in Tabella 7.

Tabella 7 – DoE secondo Job PA2200

ID	Potenza del Laser [W]	Velocità di scansione del Laser [mm/s]	Hatch Distance [mm]	Energy Density [J/mm^2]
1	21	2500	0,22	0,08
2	21	2500	0,25	0,06
3	21	2500	0,28	0,05
4	21	2500	0,31	0,04
5	21	2650	0,22	0,07
6	21	2650	0,25	0,06
7	21	2650	0,28	0,05
8	21	2650	0,31	0,04
9	21	2800	0,22	0,07
10	21	2800	0,25	0,05
11	21	2800	0,28	0,04
12	21	2800	0,31	0,04
13	24	2500	0,22	0,09
14	24	2500	0,25	0,07
15	24	2500	0,28	0,06
16	24	2500	0,31	0,05
17	24	2650	0,22	0,08
18	24	2650	0,25	0,07
19	24	2650	0,28	0,05
20	24	2650	0,31	0,04
21	24	2800	0,22	0,08
22	24	2800	0,25	0,06
23	24	2800	0,28	0,05
24	24	2800	0,31	0,04
25	24	3000	0,25	0,06

2.3.2 Preparazione e realizzazione del Job

I passaggi per la preparazione di questo secondo Job sono analoghi a quelli del Job precedente; si è quindi proceduto alla realizzazione del file CAD mediante Solidworks 2020. In questo caso, i provini sono stati sostituiti da 25 cubetti 20 mm x 20 mm x 20 mm, come mostrato in Figura 16.

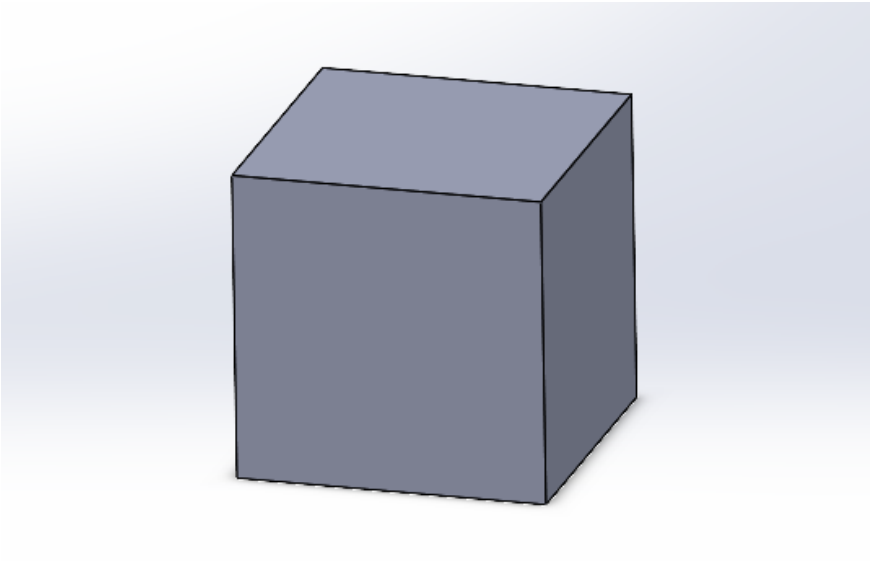


Figura 16 – CAD cubetto secondo Job

Successivamente si è proceduto al posizionamento dei cubetti in macchina, disponendoli sullo stesso piano, inclinati di 45° rispetto all'asse X e all'asse Y, al fine di poter osservare l'interazione tra il laser e la polvere al crescere progressivo della superficie da fondere per ciascuno strato, facilitando così l'individuazione di possibili problemi in fase di stampa (Figura 17).

Sfruttando il software Magics si è inserito il codice identificativo (composto da un'unica cifra) su ciascun cubetto; successivamente si è proceduto con lo slicing del file e l'inserimento dei parametri per ciascun cubo sfruttando PSW, come fatto precedentemente per i provini.

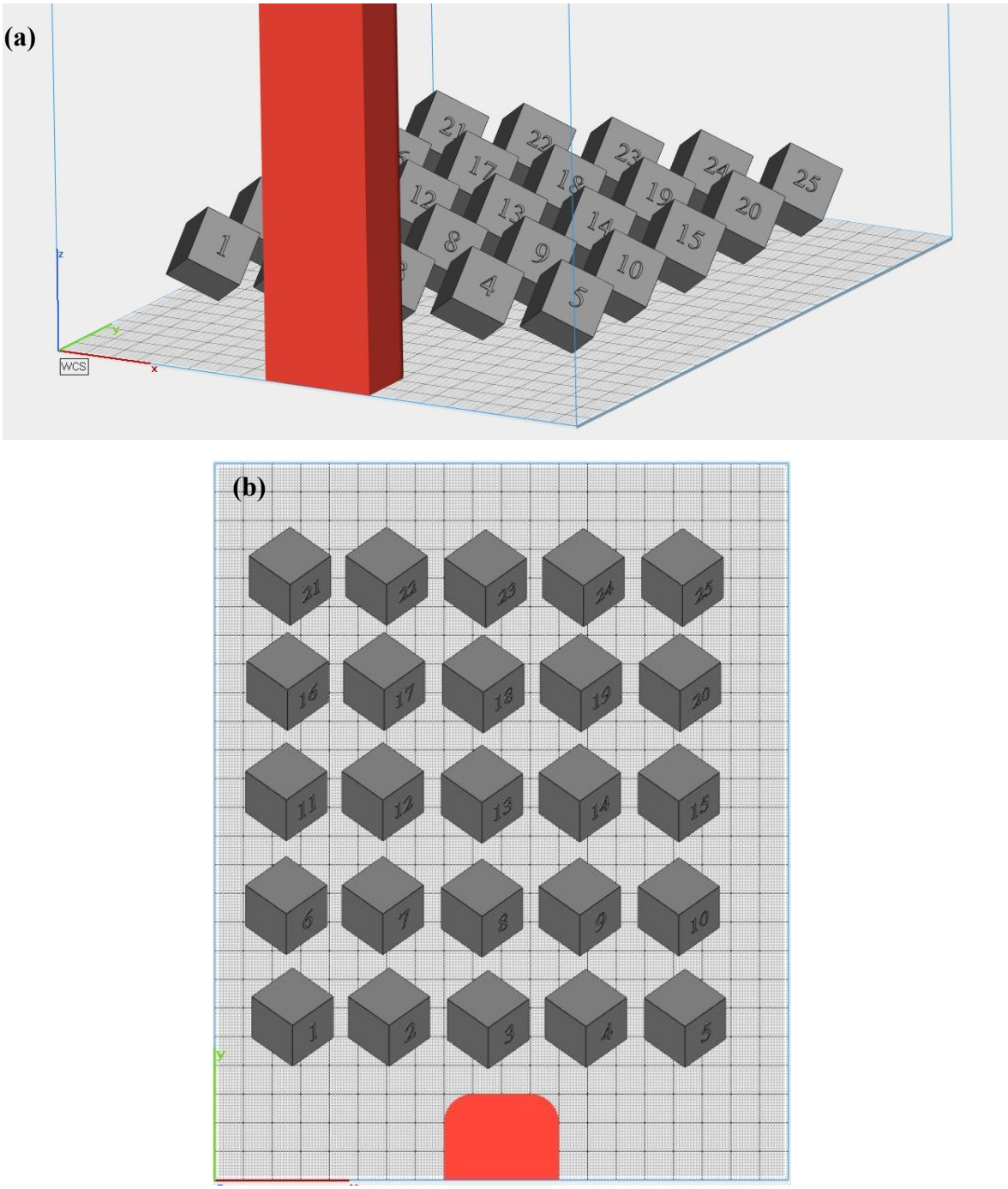


Figura 17 – Disposizione dei cubetti su Magics (a) e vista dall'alto (b)

A questo punto il job è stato mandato in stampa sulla EOS Formiga P110 Velocis (Figura 18), controllandone lo svolgimento costantemente.

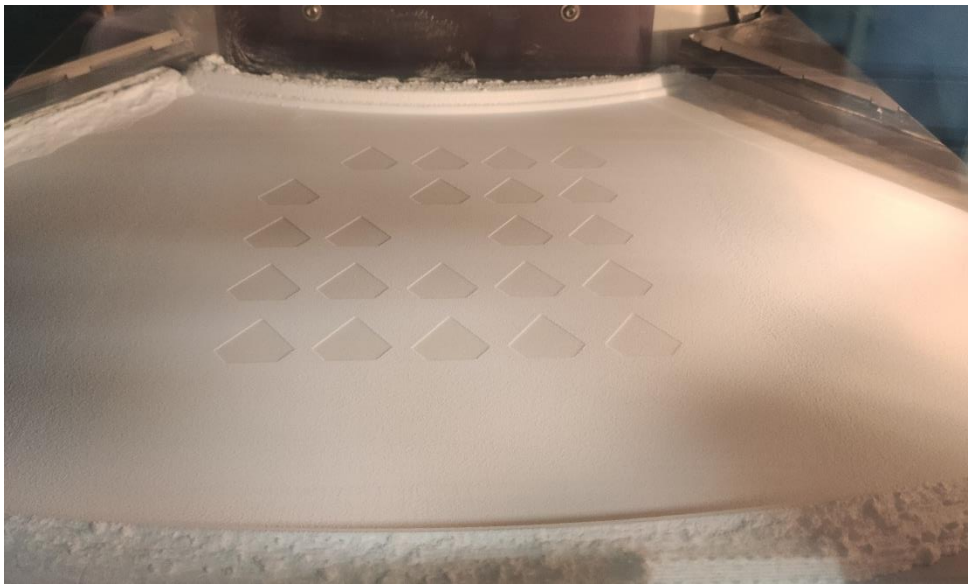


Figura 18 – Processo di stampa del Job mediante SLS

2.3.3 Risultati

Terminato il job, dopo aver aspettato un tempo sufficiente al fine di eliminare qualsiasi rischio che le parti rimosse dalla camera subiscano distorsioni termiche, i cubi sono stati estratti e ripuliti dalla polvere mediante pallinatura (si è adoperata una pallinatrice Ecoblast/F, prodotta dalla Silco S.r.l.—Italy).

Come è possibile osservare in Figura 19, i cubi identificati dai codici 13, 17 e 21 sono stati interrotti in fase di stampa in quanto si è potuto osservare come si accumulasse un'eccessiva quantità di calore in corrispondenza del letto di polvere; questo scenario era stato previsto, in quanto le combinazioni di parametri di tali pezzi producevano un valore di ED leggermente oltre il range identificato come ottimale. Per tale motivo, consapevoli che il risultato non sarebbe stato accettabile, si è scelto di interrompere momentaneamente il job per rimuovere i file di tali pezzi, in modo che il calore generato non compromettesse eventualmente i cubetti vicini.

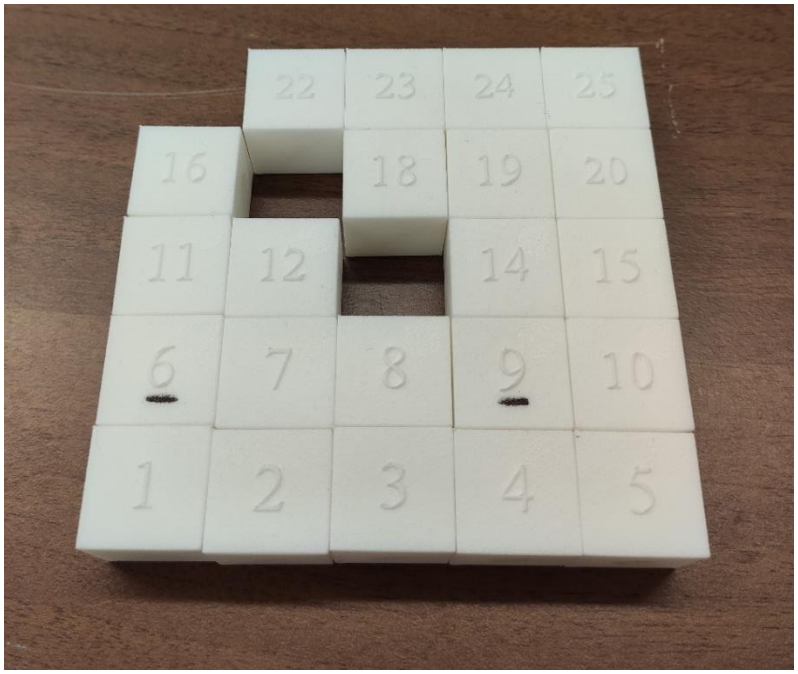


Figura 19 – Cubi estratti dalla “powder cake” e ripuliti

In questa nuova fase di studio tutti i cubi sono stati misurati, sfruttando un micrometro centesimale avente un’accuratezza di 0,01 mm, lungo le direzioni delle tre coppie di facce opposte; per fare in modo che le misure potessero essere confrontate le facce di ciascun cubo sono state numerate idealmente, a coppie opposte e a partire da quella su cui è stato posizionato il Label, come mostrato in Figura 20.

Nelle coppie di facce prive di Label la misura è stata presa al centro della faccia, mentre nella coppia di facce dove il Label è presente la misura è stata presa nei pressi dello spigolo in alto a destra; si è deciso di riportare una sola misura per ciascuna coppia di facce, in quanto non vi era interesse nello svolgere una media.

I valori ottenuti sono esposti in Tabella 8.

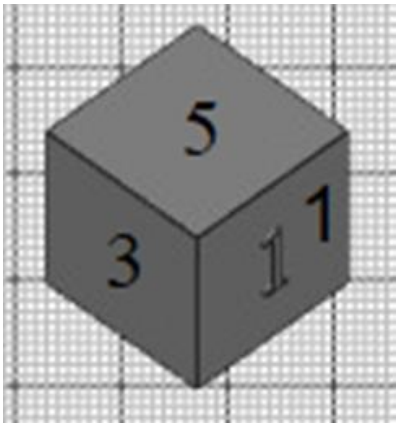


Figura 20 – Numerazione identificativa delle facce di ciascun cubetto

Tabella 8 – Risultati misure dimensionali 2° Job

MISURE				
ID	**1-2**	**3-4**	**5-6**	**Errore medio %**
1	20,63	20,66	20,65	3,23
2	20,64	20,67	20,69	3,33
3	20,61	20,67	20,69	3,28
4	20,59	20,61	20,66	3,10
5	20,53	20,56	20,65	2,90
6	20,61	20,61	20,69	3,18
7	20,64	20,66	20,69	3,32
8	20,59	20,61	20,65	3,08
9	20,53	20,58	20,63	2,90
10	20,60	20,67	20,67	3,23
11	20,53	20,55	20,58	2,77
12	20,56	20,59	20,60	2,92
14	20,66	20,72	20,69	3,45
15	20,65	20,66	20,72	3,38
16	20,50	20,51	20,57	2,63
18	20,67	20,73	20,70	3,50
19	20,68	20,71	20,70	3,48
20	20,54	20,61	20,63	2,97
22	20,70	20,72	20,68	3,50
23	20,69	20,72	20,69	3,50
24	20,61	20,64	20,59	3,07
25	20,72	20,80	20,76	3,80

Un'analisi dei dati mostra come le dimensioni dei cubetti ottenuti siano prossime a quelle nominali; i valori dimensionali misurati per le diverse coppie di facce sullo stesso cubetto si discostano al massimo di circa un decimo di millimetro.

Per ciascun cubetto è stato calcolato l'errore medio percentuale come media aritmetica degli errori percentuali di ciascuna misura per ogni pezzo; dai risultati si nota come l'errore sia intorno al 3% per tutti i cubetti, a testimonianza del fatto che all'interno del range di ED impostato, per tutte le combinazioni di parametri testate, la tecnica di SLS permette di raggiungere una precisione dimensionale molto alta.

Da una semplice analisi visiva, i cubi risultano molto simili tra loro, difficilmente senza un test più specifico e preciso è possibile stabilire i parametri ottimali; il cubo con numero identificativo 25 è l'unico che mostra una porosità notevole anche ad un primo sguardo, e una rugosità al tatto maggiore rispetto agli altri.

Capitolo 3: Sperimentazione sul composito: l'Alumide

3.1 Ottimizzazione dei parametri di processo

3.1.1 Produzione Cubetti DoE

Come fatto precedentemente per lo studio dei parametri per la PA2200, si è deciso di operare allo stesso modo al fine di identificare i parametri ottimali per l'Alumide. A tal proposito si è strutturato un Full Factorial Design of Experiment (DoE) con le tre variabili usate in precedenza: potenza del laser (2 livelli), Velocità di scansione del fascio (3 livelli) e hatch distance (4 livelli). Vista la necessità di provare diverse combinazioni di parametri e poiché i pezzi prodotti dal job non devono essere analizzati mediante test di tipo distruttivo, si è impostata una sola ripetizione per ciascuna combinazione di parametri.

In virtù delle considerazioni fatte in precedenza per la PA2200, anche in questo caso i valori inseriti nel DoE sono stati scelti ponendo particolare attenzione al valore di Energy Density, facendo si che esso non vada mai molto oltre i limiti stabiliti dalla letteratura. I valori della velocità di scansione sono analoghi a quelli visti precedentemente nel secondo Job svolto sul nylon, mentre per i valori di potenza del fascio si è stabilito di utilizzare il valore di default della EOS (21 W) ed il valore massimo inseribile dal software PSW, ossia 25 W.

Anche in questo caso, per lo svolgimento del DoE, si è optato per produrre dei cubetti aventi dimensioni 20 mm x 20 mm x 20 mm, come mostrato in precedenza in Figura 16; i cubi sono stati disposti in maniera analoga a quanto fatto per gli studi sulla poliammide, sullo stesso piano ed inclinati di 45° rispetto all'asse x e all'asse y (si veda la Figura 17).

Per eliminare qualsiasi tipo di influenza della posizione nel piano di lavoro sui risultati, i parametri sono stati assegnati ai cubetti in maniera casuale; inoltre, è stato inserito un cubetto in più (per un totale di 25 pezzi) avente parametri analoghi a quelli del cubo situato al centro dell'area di lavoro, che teoricamente raggiunge temperature più alte rispetto alle zone prossime alle pareti della macchina in quanto tra quest'ultime e il letto di polvere avvengono fenomeni di scambio termico di tipo convettivo.

Il DoE è contenuto in Tabella 9.

Tabella 9 – DoE cubetti Alumide

ID	Potenza del Laser [W]	Velocità di scansione del Laser [mm/s]	Hatch Distance [mm]	Energy Density [J/mm^2]
1	25	2500	0,26	0,07
2	21	2800	0,26	0,05
3	21	2500	0,24	0,07
4	25	2650	0,26	0,06
5	21	2650	0,26	0,05
6	21	2800	0,30	0,04
7	25	2500	0,28	0,06
8	25	2800	0,24	0,07
9	25	2650	0,30	0,05
10	21	2800	0,24	0,06
11	25	2500	0,24	0,08
12	21	2650	0,28	0,05
13	21	2650	0,30	0,04
14	21	2500	0,30	0,04
15	21	2800	0,28	0,04
16	21	2650	0,24	0,06
17	21	2500	0,28	0,05
18	25	2650	0,28	0,05
19	25	2650	0,24	0,07
20	25	2800	0,30	0,05
21	25	2500	0,30	0,05
22	21	2500	0,26	0,06
23	25	2800	0,28	0,05
24	25	2800	0,26	0,06
25	21	2650	0,30	0,04

La procedura per l'avvio del Job si compone, come visto precedentemente, di due passaggi fondamentali: lo slicing mediante il software RP Tools e, successivamente, l'assegnazione per ciascun cubo dei corrispondenti parametri di stampa, secondo i valori riportati nella precedente tabella.

Lo spessore di ciascuno strato è stato mantenuto al valore di 0,1 mm; sono state impostate anche le temperature da raggiungere per poter iniziare la produzione del Job, e nella fattispecie la temperatura della building chamber è stata fissata a 170 °C mentre quella della removal chamber è stata impostata a 154 °C per prevenire le contrazioni che avvengono in fase di raffreddamento [5]; il tempo previsto per la stampa è di 135 minuti.

Durante lo svolgimento del job, fin dalla stesura dei primi strati in cui il fascio laser non colpisce il letto di polvere, si è potuto osservare come la polvere di Alumide risulti essere decisamente meno scorrevole rispetto a quella della PA2200 a queste temperature; talvolta il passaggio della racla comportava la formazione di solchi sul letto di polvere. Sebbene dopo i primi strati il problema sembrava apparentemente risolto.

Sebbene dopo i primi strati il problema sembrava apparentemente risolto, nella fase iniziale di costruzione dei cubi, quando la sezione occupata dai pezzi nel singolo strato si presenta ridotta in virtù dell'inclinazione ad essi fornita (dall'alto si osservano solo triangoli di piccole dimensioni), si è potuto assistere alla rimozione di alcune delle parti per mezzo della racla. Tali parti, durante lo svolgimento dei restanti strati del job, sono state trasportate lungo il piano di lavoro, generando spesso dei grossi solchi, come è possibile osservare in Figura 21a. In alcuni strati, il trascinamento dei residui rimossi in fase iniziale ha comportato la formazione di dossi di polvere in corrispondenza delle zone destinate alla realizzazione delle sezioni di altri cubetti, compromettendone la corretta formazione dello strato (Figura 21b).

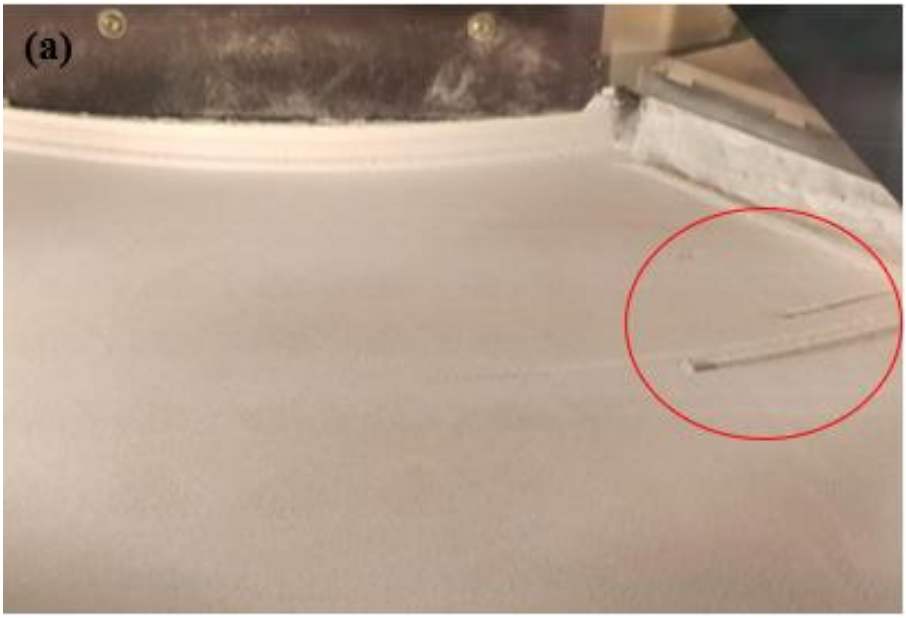


Figura 21 – Trascinamento di alcuni pezzi sul piano (a); formazione di solchi sul letto di polvere in corrispondenza dei cubetti (b)

Trascorsa circa la metà del tempo di stampa previsto per il completamento del job, uno dei pezzi che era stato rimosso nelle fasi iniziali si è sovrapposto, in seguito ai movimenti della racla, alla sezione del cubo identificato con il codice ID 6, e durante il successivo riscaldamento da parte del fascio laser è stato fuso con esso.

In un primo momento, questo ha, tuttavia, comportato la formazione di un ulteriore dislivello di dimensioni notevoli e, durante il passaggio immediatamente successivo della racla, questo ha fatto si che il pezzo si spostasse leggermente lungo il piano di lavoro e che si generasse una crepa (che è stata poi riempita in maniera non corretta durante la stesura successiva). Il tutto è mostrato nella Figura 22.

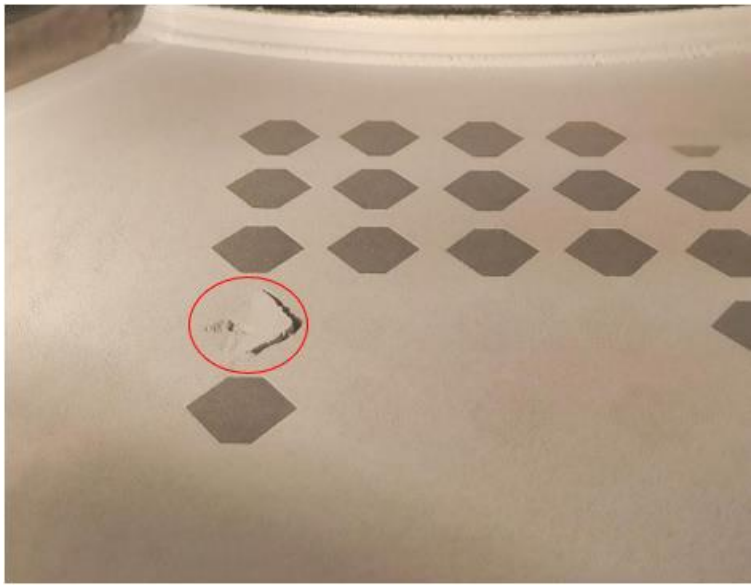


Figura 22 – Rifusione di uno dei frammenti rimossi con un altro cubo e formazione della crepa

Mediante la completa osservazione del processo di realizzazione del job per tutta la sua durata, si è potuto constatare come le parti dei pezzi siano state rimosse solo nella fase iniziale, ossia quando la superficie fusa risultava essere di dimensioni ridotte (piccoli triangoli), mentre il problema non si è presentato nuovamente nel momento in cui la superficie assumeva dimensioni maggiori, sebbene spesso i solchi causati dai frammenti abbiano compromesso la corretta planarità dello strato depositato.

Terminato il job, i cubetti sono stati estratti dalla macchina insieme alla “powder cake” e attentamente ripuliti dalla polvere in eccesso, inizialmente in maniera grossolana e successivamente mediante processo di pallinatura, sfruttando aria compressa e sfere di vetro.

Una volta fatto ciò, si è proceduto alla misurazione delle dimensioni dei cubi mediante micrometro centesimale e ad una prima misura del peso degli stessi. Come attuato in precedenza per i cubetti di PA2200, sono state misurate le tre coppie di facce identificate nella Figura 18; ancora una volta la misura è stata presa al centro per le coppie di facce prive di Label per il riconoscimento, mentre per la restante coppia di facce la misura è stata presa nei pressi dello spigolo in alto a destra dell'etichetta. I valori ottenuti sono riportati rispettivamente in Tabella 10 e in Tabella 11.

Tabella 10 – Misure DoE Alumide

MISURE				
ID	**1-2 [mm]**	**3-4 [mm]**	**5-6 [mm]**	**Errore medio %**
1	19,96	20,07	20,09	0,20
2	19,92	19,96	20,05	-0,12
3	20,01	20,08	20,17	0,43
4	19,98	20,09	20,20	0,45
5	19,89	19,98	20,01	-0,20
6	/	/	/	/
7	20,29	20,04	20,43	1,27
8	20,20	20,08	20,46	1,23
9	20,22	19,98	20,53	1,22
10	19,90	19,90	20,39	0,32
11	20,02	20,25	20,46	1,22
12	19,95	19,96	19,94	-0,25
13	19,90	20,16	19,91	-0,06
14	19,90	20,01	19,90	-0,32
15	19,90	20,38	20,12	0,67
16	19,97	20,02	19,91	-0,17
17	19,98	20,04	20,00	0,03
18	20,00	20,08	20,05	0,22
19	20,05	20,19	20,15	0,65
20	19,93	20,04	19,92	-0,18
21	19,97	20,05	19,95	-0,05
22	20,04	20,10	20,08	0,37
23	20,00	20,08	20,04	0,20
24	20,04	20,16	20,06	0,43
25	19,93	19,99	19,94	-0,23

Tabella 11 – Peso cubi DoE Alumide

ID	Peso [g]
1	10,96
2	10,85
3	11,05
4	11,07
5	10,82
6	10,38
7	11,14
8	11,18
9	11,07
10	10,95
11	10,93
12	10,73
13	10,62
14	10,71
15	10,58
16	10,87
17	10,83
18	10,88
19	11,05
20	10,76
21	10,89
22	10,84
23	10,76
24	10,91
25	10,53

La misura delle dimensioni dei cubi con il micrometro, in alcuni casi, è stata particolarmente difficile; alcuni dei cubi presentavano una marcata delaminazione, o una non corretta planarità delle facce causata dagli spostamenti generati in seguito ai contatti con la racla.

A tal proposito, il cubo identificato con ID 6, mostrato in Figura 23, che durante il job ha subito il processo descritto precedentemente, presenta una delaminazione evidente, con uno spostamento della base del cubo rispetto alla restante parte, e ciò ha reso impossibile l'acquisizione delle misure.

Da un'analisi dei valori ottenuti si nota come l'errore medio risulti essere relativamente basso, sempre al di sotto dell'1,3%, e in molti casi al di sotto dell'1%; la scarsa qualità dei cubetti ha comportato la presenza di dimensioni molto variabili tra di loro.

Facendo riferimento ai primi 5 cubi, che durante il job sono andati in contro a meno problematiche causate dalla rimozione di altre parti, si nota come l'errore sia molto contenuto (sempre inferiore allo 0,5%). Per quanto riguarda il peso, in generale presenta un valore compreso tra i 10 e gli 11 grammi.

Figura 23 – Delaminazione marcata del cubo avente ID 6

Come si può vedere nella Figura 24a, dall'osservazione dal basso dei cubetti (ossia dal punto in cui essi sono stati originati), si è potuto identificare chiaramente quali pezzi hanno subito la rimozione degli strati sottostanti a causa dalla racla; inoltre, prendendo in considerazione il fatto che il cubo avente ID 14, mostrato in Figura 24b, ha risentito in fase di stampa dello spostamento del cubo adiacente, è possibile notare come lo spostamento sia avvenuto esclusivamente nei pezzi situati all'inizio e alla fine di alcune file.

Tramite una valutazione dei parametri assegnati ai cubetti, nonché dei valori di Energy Density ottenuti, non è stata riscontrata alcuna correlazione tra il ripetersi di certi parametri e i cubi in cui sono avvenuti dei problemi in fase di costruzione. L'unica circostanza comune era la maggiore vicinanza alle pareti, e quindi una temperatura del letto di polvere che

potrebbe essere stata leggermente più bassa rispetto alla zona centrale della camera a causa dei fenomeni conduttivi. Un altro aspetto fondamentale potrebbe essere legato al fatto che i problemi si sono riscontrati solo quando la superficie del pezzo era più bassa.

I cubi vengono mostrati nel loro insieme in Figura 25.

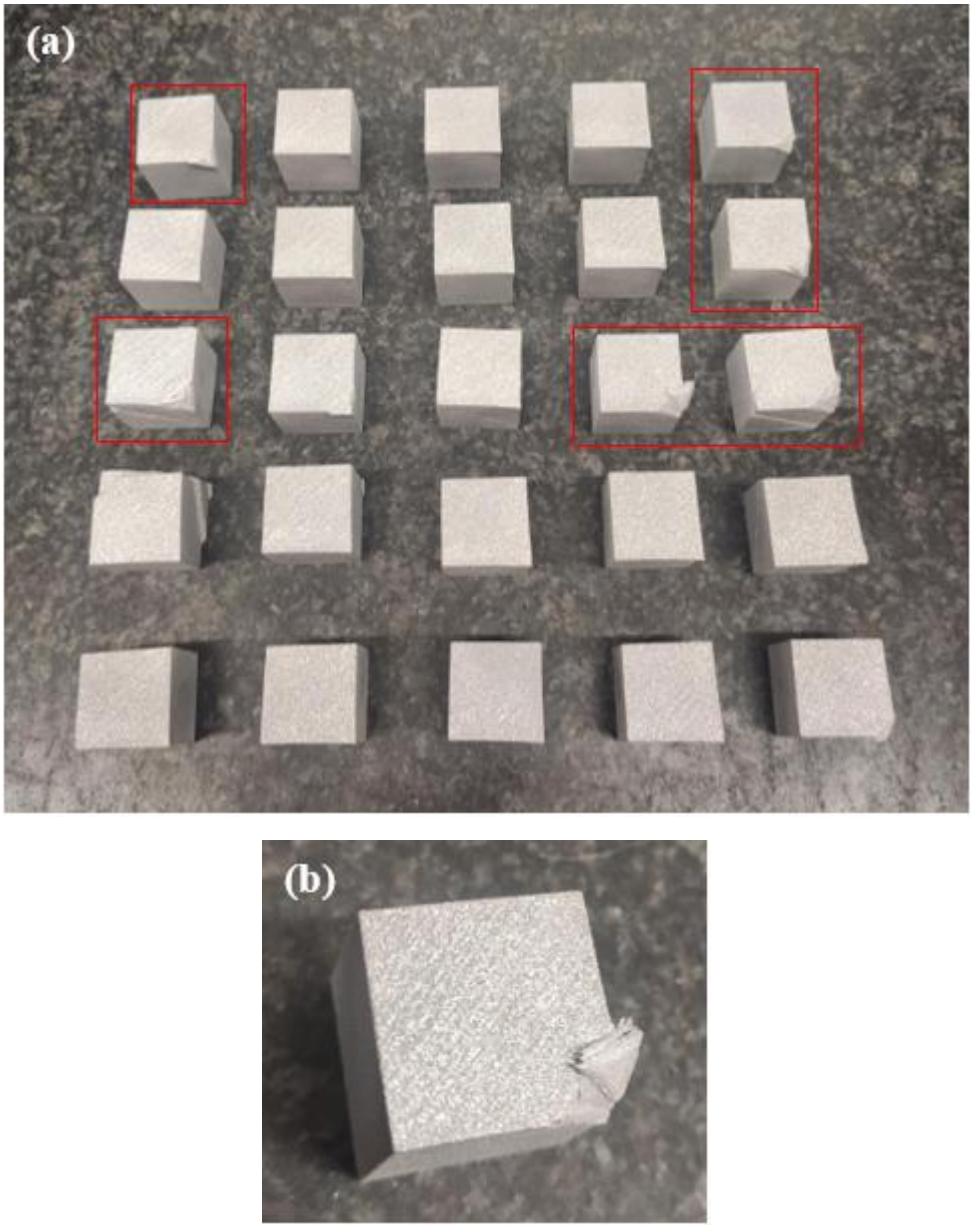


Figura 24 – Vista dal basso dei cubi (a), particolare della parte inferiore del cubo avente ID 14 (b)

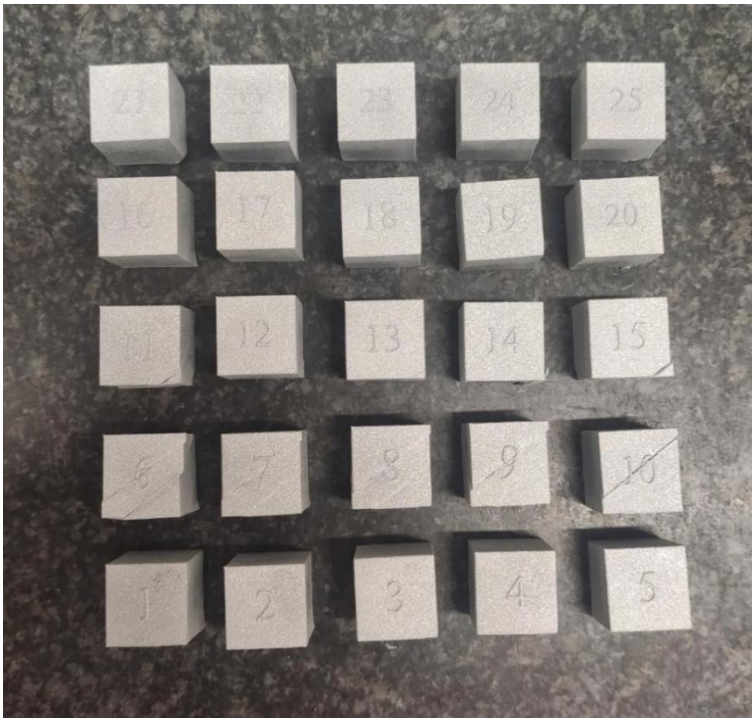


Figura 25 – Vista dei cubi lato Label

I dati estrapolati da questo primo Job si sono rivelati inconsistenti, in quanto per diversi cubetti (per esempio tutta la seconda file di cubetti dall'identificativo ID 6 a all'identificativo ID 10) non si è potuto procedere ad una misura della densità a causa delle crepe e delle difettosità che essi presentavano.

Poiché le problematiche riscontrate non sono legate solo ai parametri del singolo pezzo, ma anche a come il trascinamento di alcune parti sul piano di lavoro abbia influenzato i cubetti vicini, ciò avrebbe portato ad una esclusione a priori di parametri senza un riscontro veritiero e motivato, venendo meno agli obiettivi del DoE.

A tal proposito si è scelto di continuare ad adoperare lo stesso DoE per quanto riguarda le combinazioni dei parametri per l'hatching, ma modificando i valori assegnati agli stessi parametri, potenza e velocità di scansione, per il contour; si è, infatti, notato come nel caso di alcuni cubi che in fase di stampa subivano una rimozione in seguito all'urto con la racla era possibile osservare un certo dislivello rispetto allo strato di polvere causato da un rialzo della polvere in prossimità del contour. Questo ha portato alla conclusione per cui alcuni set di parametri utilizzati per l'hatching non si abbinavano in maniera corretta a quelli assegnati al contour, e che questa potesse essere la causa dei problemi.

Sono stati lanciati diversi Job al fine di indagare sull'effetto che i parametri assegnati al contour hanno sulla realizzazione dei cubetti; in prima analisi si è stabilito come non sia possibile variare tali parametri per ciascun pezzo, in quanto questo comporterebbe un numero troppo alto di variabili in gioco.

Si è inoltre compreso come la potenza del laser durante la realizzazione del contour debba essere inferiore a quella dell'hatching per evitare un surriscaldamento della parte, ma non eccessivamente distante da tale valore.

In uno dei Job provati sono stati scelti i parametri del contour nel seguente modo:

- P_c = 19 [W];
- v_c = 1800 [mm/s];
- LED = 0,0106 [J/mm];

dove LED indica la Line Energy Density, ottenuta dal rapporto tra la potenza del fascio e la velocità di scansione che si impongono nel contour, e rappresenta il parametro di scelta, in quanto si è deciso di ottenere un valore di densità di energia il più possibile prossimo a quello dei parametri di Default che la EOS fornisce, ma alzando la potenza rispetto a tali valori.

Il risultato, mostrato in Figura 26, sebbene sia stato negativo, in quanto la quasi totalità dei cubi è stata colpita dalla racla o da altri pezzi vicini, ha in realtà permesso di trarre delle considerazioni sui cubetti che sono rimasti fermi nelle rispettive posizioni. Tra i pezzi che sono rimasti più o meno saldi al momento di interruzione del job si è potuto notare come tutti presentassero un valore di ED compreso tra $0{,}045\ \frac{J}{mm^2}$ e $0{,}062\ \frac{J}{mm^2}$; inoltre, osservando la realizzazione del Job, si è potuto individuare alcune combinazioni di parametri che fin dai primi strati risultavano problematiche, e si è deciso di eliminarle nei Job seguenti.

Figura 26 – Risultato Job con i parametri del contour modificati

Visti i problemi riscontrati nei Job svolti in precedenza, caratterizzati dalla rimozione di alcuni pezzi da parte della racla con una conseguente compromissione dell'intero set di cubetti, e sulla base delle conoscenze acquisite da essi, si è deciso di stampare dei cubetti di dimensioni inferiori (10 mm x 10 mm x 10 mm), disposti sullo stesso piano con un lato parallelo al piano X-Y ed inclinati di 15° rispetto alla direzione di stesura della polvere.

Si è scelto di disporre i pezzi in questo modo al fine di rendere l'impatto con la racla il più graduale possibile, e per cercare di evitare che i problemi di un cubetto si riversino sugli altri. In Figura 27 è possibile osservare come i pezzi sono stati disposti su Magics.

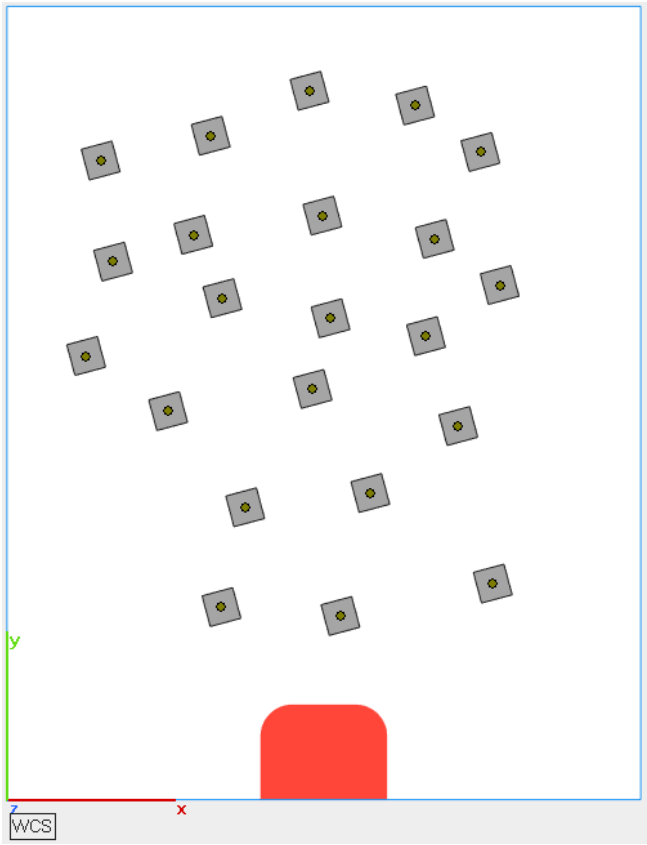


Figura 27 – Disposizione Cubetti su Magics: vista superiore

I parametri assegnati a ciascun pezzo seguono quasi interamente il DoE svolto nelle prove precedenti, fatta eccezione per due coppie di parametri giudicate non idonee alla produzione con l'Alumide, almeno utilizzando i valori individuati in precedenza per la realizzazione del contour; questi set di valori sono:

- P = 25 w, v = 2650 mm/s, H_d = 0,26 mm
- P = 25 w, v = 2800 mm/s, H_d = 0,24 mm

Inoltre, è stato eliminato anche il cubetto precedentemente identificato con il numero ID 25, in quanto semplice ripetizione di parametri già assegnati; sono stati, infine, aggiunti due cubetti aventi parametri precedentemente testati e risultati idonei al completamento del pezzo, con contour di default.

In Tabella 12 è possibile osservare il DoE di riferimento per il Job.

Tabella 12 – DoE Job Alumide cubetti 10 mm x 10 mm x 10 mm

ID	Potenza del Laser [W]	Velocità di scansione del Laser [mm/s]	Hatch Distance [mm]	Energy Density [J/mm^2]
1	25	2500	0,26	0,067
2	21	2800	0,26	0,05
3	21	2500	0,24	0,066
4	23	2200	0,22	0,097
5	21	2650	0,26	0,053
6	21	2800	0,3	0,038
7	25	2500	0,28	0,057
8	25	2650	0,3	0,047
9	21	2800	0,24	0,059
10	25	2500	0,24	0,078
11	21	2650	0,28	0,046
12	21	2650	0,3	0,04
13	21	2500	0,3	0,042
14	21	2800	0,28	0,043
15	21	2650	0,24	0,062
16	21	2500	0,28	0,048
17	25	2650	0,28	0,054
18	25	2650	0,24	0,074
19	25	2800	0,3	0,045
20	25	2500	0,3	0,050
21	21	2500	0,26	0,056
22	25	2800	0,28	0,051
23	25	2800	0,26	0,059
24	21	2500	0,25	0,061

Le righe evidenziate in giallo rappresentano i due cubetti di riferimento, aventi come parametri di Contour una potenza pari a 16 W e una velocità di scansione pari a 1500 mm/s; per tutti gli altri pezzi i valori dei parametri per il Contour, determinati mediante ragionamenti sui tentativi precedenti, risultano essere: P_c = 19 W, v_c = 1800 mm/s (tali parametri permettono di avere una potenza maggiore, mantenendo comunque una Line Energy Density prossima a quella raggiunta con i valori di default).

Per quanto riguarda le due righe evidenziate in rosso, esse rappresentano i parametri di due cubetti che, dopo i primi layer del Job, sono stati subito rimossi dalla racla, a causa di una distribuzione del calore tale da far rialzare lo strato, ed interrotti. In seguito a questa interruzione il Job è stato poi lanciato nuovamente dall'inizio, senza i due pezzi problematici, e portato a termine in circa quaranta minuti.

I cubetti sono stati successivamente rimossi in maniera ordinata e con cautela dalla macchina, sottoposti ad un processo di pallinatura mediante la Ecoblast/F, prodotta dalla Silco S.r.l.—Italy per rimuovere la polvere in eccesso e sottoposti ad una serie di misurazioni volte all'identificazione dei parametri di processo ottimali la sinterizzazione dell'Alumide mediante EOS FORMIGA P110 Velocis.

3.1.2 Analisi della densità mediante principio di Archimede

Terminata la fase di produzione, sono state misurate le tre dimensioni dei cubetti mediante un micrometro centesimale avente un'accuratezza di 0,01 mm. Per tutti i pezzi le misure dimensionali sono state prese nelle direzioni dei tre assi coordinati; in particolare l'altezza Z corrisponde alla misura dei campioni nella direzione di costruzione e crescita degli strati.

Le misure lungo gli assi X, Y e Z per ciascun cubetto, nonché il valore dell'errore medio percentuale, calcolato come media aritmetica degli errori percentuali per ciascun asse, e il peso, vengono mostrate in Tabella 13.

I valori associati al cubetto 2 lungo l'asse Z risultano non conformi; questo poiché intorno al centesimo layer, a circa 8 mm di altezza del cubetto in costruzione, un frammento di strato dei cubetti precedentemente interrotti rimasto nella polvere è stato trascinato dalla racla creando un solco in prossimità di tale campione; questo ha comportato, in fase di rimozione e pulizia del pezzo, la separazione dello stesso in due parti. Ciò è mostrato in Figura 28.

Tabella 13 – Misure DoE Alumide cubetti 10 mm x 10 mm x 10 mm

MISURE					
ID	**X [mm]**	**Y [mm]**	**Z [mm]**	**Errore medio %**	**P [g]**
1	/	/	/	/	/
2	9,83	9,85	7,95	-7,90	1,29
3	9,94	9,95	10,15	0,13	1,32
4	10,15	10,18	10,20	1,77	1,36
5	/	/	/	/	/
6	9,81	9,79	10,16	-0,80	1,24
7	9,95	9,94	10,18	0,23	1,33
8	9,92	9,92	10,17	0,03	1,32
9	9,85	9,88	10,17	-0,33	1,30
10	9,97	9,97	10,17	0,37	1,32
11	9,82	9,83	10,18	-0,57	1,28
12	9,84	9,83	10,19	-0,47	1,28
13	9,82	9,85	10,18	-0,50	1,28
14	9,82	9,81	10,19	-0,60	1,28
15	9,90	9,91	10,17	-0,07	1,31
16	9,91	9,91	10,19	0,03	1,32
17	9,91	9,92	10,18	0,03	1,32
18	9,99	9,98	10,19	0,53	1,33
19	9,91	9,89	10,18	-0,07	1,31
20	9,88	9,90	10,17	-0,17	1,32
21	9,91	9,90	10,16	-0,10	1,31
22	9,89	9,92	10,16	-0,10	1,30
23	9,96	9,95	10,16	0,23	1,32
24	9,97	9,97	10,18	0,40	1,33

Figura 28 – Separazione Cubetto ID 2

I valori ottenuti per tutti i cubetti presentano un trend chiaramente definito: le dimensioni lungo l'asse X e lungo l'asse Y risultano essere molto prossime tra loro ed inferiori, al più di 0,20 mm, rispetto alla grandezza nominale (10 mm); la dimensione lungo l'asse Z risultano essere, invece, superiori a quella nominale e pari a circa 10,2 mm. Il motivo di ciò è legato al fatto che la faccia inferiore del cubetto, che in fase di costruzione è a contatto con gli strati di separazione dei pezzi dalla piattaforma, presenta una leggera deformazione.

L'errore medio percentuale dei singoli campioni, escludendo il cubetto 2 per via delle problematiche riscontrate nel corso del Job, si aggira intorno allo 0,5% e in ogni caso sempre inferiore all'1% (ad eccezione del numero 4, avente parametri di riferimento).

L'errore è spesso influenzato dal valore della misura lungo l'asse Z; infatti, analizzando l'errore medio percentuale delle misure svolte secondo il piano X-Y otteniamo un valore prossimo all'unità, in valore assoluto.

Successivamente si è proceduto al calcolo della densità secondo il Principio di Archimede mediante l'utilizzo di una bilancia idrostatica utilizzando acqua distillata a 25 °C [45], [46].

Questo tipo di sistema permette di calcolare, tra le altre cose, la densità effettiva considerando l'effettivo volume del campione. Dapprima il campione viene pesato direttamente in aria; dopodiché, il peso del cubo immerso nel fluido permette il calcolo del volume effettivo, comprensivo delle porosità contenute nel campione. Una successiva pesatura del campione in aria, dopo l'immersione, permette di differenziare le porosità racchiuse, interne al cubo, da quelle superficiali. La quantità di fluido intrappolata in questi pori andrà ad aumentare il peso iniziale del campione.

Tali porosità prendono il nome di porosità aperte (open porosity) e, poiché potrebbero essere connesse a fattori quali crepe sulle superfici del pezzo o rugosità superficiale, vanno escluse dal computo della densità del campione.

Nel dettaglio, il processo adottato può essere suddiviso in tre step:

- Pesatura del cubo in aria (weight in air), ripetuta tre volte per ottenerne una media;
- Immersione del campione in acqua distillata a 25 °C, mediante un'apposita struttura, e lettura del peso (weight in water);
- Rimozione del campione dall'acqua, asciugatura superficiale dello stesso per rimuovere l'acqua rimasta all'esterno, e successiva pesatura (wet weight).

La densità effettiva, misurata in g/cm^3, è comprensiva di entrambe le tipologie di porosità ed è calcolata dalla formula seguente:

$$Effective\ density = \frac{water's\ density * weight\ in\ air}{wet\ weight - weight\ in\ water}$$

dove la densità dell'acqua a 25 °C è considerata pari a 997 kg/m^3. Viene inoltre calcolata la densità relativa (Relative density) come rapporto tra la densità effettiva (Effective density) e la densità nominale del materiale in esame, ossia dell'Alumide, che è stata considerata pari a 1360 kg/m^3 [34].

In Tabella 14 sono riassunti i valori dei pesi e della densità ottenuti seguendo la procedura precedentemente descritta.

Tabella 14 – Misure di densità mediante Principio di Archimede

ID	Peso in Aria [g]	Peso in Acqua [g]	Peso Bagnato [g]	Densità Apparente [g/cm^3]	Densità Effettiva [g/cm^3]	Porosità Aperte [%]	Porosità Chiuse [%]	Densità Relativa [%]
1	/	/	/	/	/	/	/	/
2	1,0000	0,252	1,001	1,333	1,331	0,13	1,99	98,01
3	1,3225	0,3495	1,3245	1,355	1,352	0,20	0,36	99,64
4	1,3642	0,3559	1,3663	1,349	1,346	0,21	0,81	99,19
5	/	/	/	/	/	/	/	/
6	1,2407	0,2909	1,2441	1,302	1,298	0,36	4,22	95,76
7	1,3281	0,3528	1,3296	1,358	1,356	0,16	0,17	99,83
8	1,3207	0,3477	1,3228	1,353	1,350	0,21	0,49	99,50
9	1,3022	0,3429	1,3043	1,353	1,350	0,22	0,49	99,51
10	1,3224	0,3461	1,3242	1,350	1,348	0,19	0,70	99,30
11	1,2825	0,3257	1,2836	1,336	1,335	0,12	1,73	98,26
12	1,2801	0,3238	1,2832	1,335	1,330	0,33	1,86	98,13
13	1,2833	0,3283	1,2854	1,340	1,337	0,22	1,49	98,51
14	1,2751	0,3188	1,2765	1,329	1,327	0,14	2,25	97,75
15	1,3131	0,3419	1,3141	1,348	1,347	0,11	0,88	99,12
16	1,3170	0,344	1,3179	1,349	1,348	0,09	0,77	99,23
17	1,3175	0,3478	1,3184	1,355	1,353	0,09	0,40	99,60
18	1,3332	0,3494	1,3338	1,351	1,350	0,06	0,65	99,34
19	1,3099	0,3418	1,3107	1,349	1,348	0,08	0,81	99,19
20	1,3160	0,3494	1,3172	1,357	1,356	0,12	0,19	99,81
21	1,3127	0,3427	1,3134	1,349	1,348	0,07	0,79	99,21
22	1,3036	0,3354	1,3041	1,342	1,342	0,05	1,30	98,70
23	1,3194	0,3267	1,32	1,325	1,324	0,06	2,56	97,43
24	1,3301	0,3488	1,3308	1,351	1,350	0,07	0,63	99,37

Osservando i risultati ottenuti è possibile notare come i valori di densità relativa calcolati per tutti i cubetti siano prossimi al valore teorico di densità fornito dai Datasheet della EOS [34]. La maggior parte delle porosità si trova all'interno dei campioni, essendo il valore di porosità aperta molto ridotto.

Confrontando i risultati ottenuti mediante la prova di Archimede con quelli ottenuti dalle misure dimensionali svolte con il micrometro è possibile affermare che i cubetti che presentano un errore dimensionale più basso e un valore di densità relativa maggiore sono

il 3, il 7, il 10, il 18 e il 20, oltre al 24 con i parametri di default che la EOS fornisce per il PA2200.

Tuttavia, tra i cubetti elencati, si è scelto di prendere come riferimento quello con identificativo 20, i cui parametri sono:

- P = 25 W;
- V = 2500 mm/s;
- H_d = 0,3 mm;
- ED = 0,05 J/mm^2;
- Contour con P_c = 19 W e v_c = 1800 mm/s.

Il cubetto viene mostrato in Figura 29, mentre l'intero Job è mostrato in Figura 30.

Figura 29 – Cubetto 20 con parametri designati come ottimali

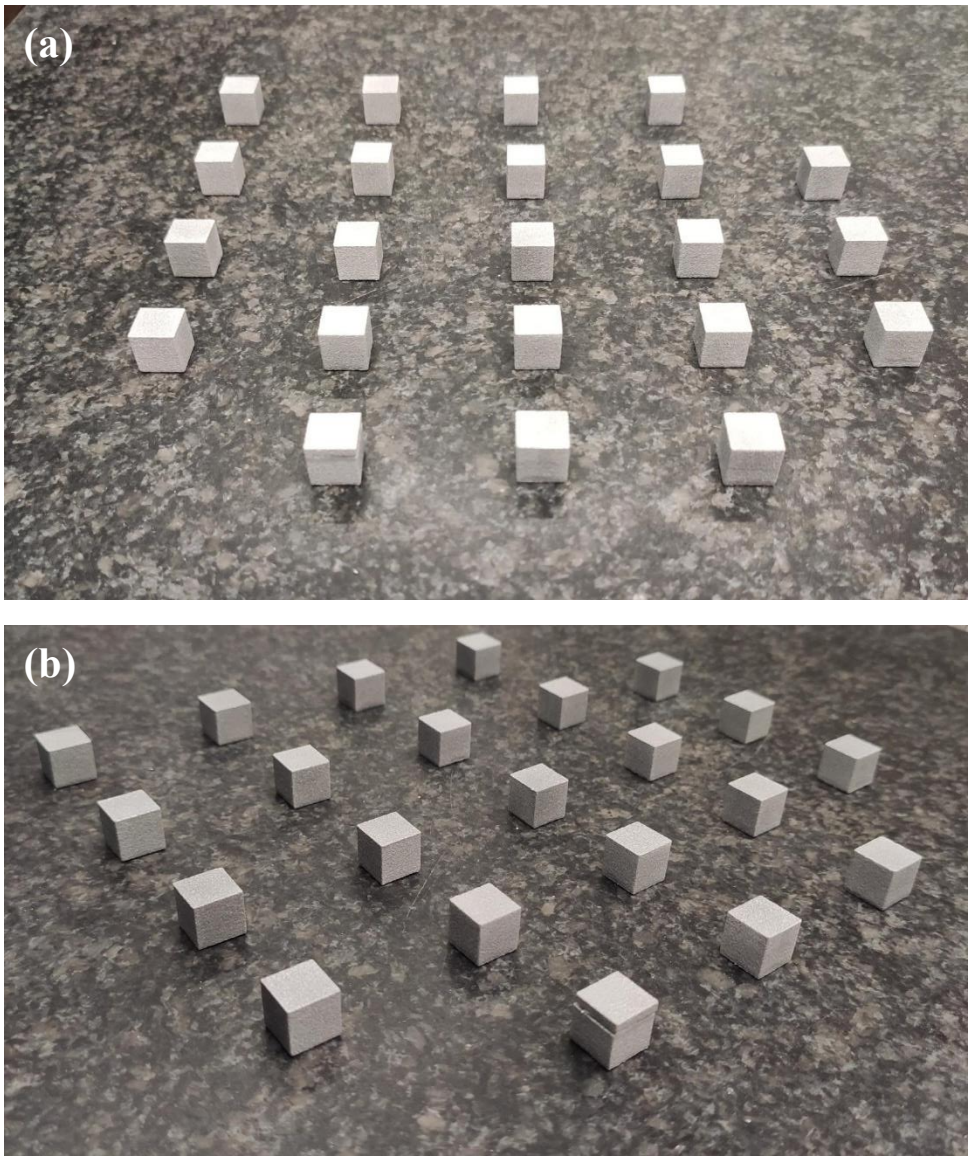


Figura 30 – Job Cubetti Alumide vista frontale angolata (a) e vista di sbieco (b)

È necessario, tuttavia, specificare che i parametri ottimali identificati, pur garantendo un ottimo valore di densità del componente, si sono rivelati non idonei alla produzione dei provini di trazione. A causa di problemi di natura termica, infatti, i primi strati dei provini, avendo una superficie superiore rispetto a quella dei cubetti visti in precedenza, subivano un'eccessiva deformazione, con conseguente impatto con la racla nel suo movimento da destra verso sinistra; ciò comprometteva la corretta realizzazione dell'intero Job.

A tal proposito, si è provveduto a riportare i parametri di contour ai valori di default, e ad incrementare l'Hatching Distance di 0,2 mm; per verificare che tali parametri, che meglio

si comportavano in fase di produzione dei provini, fossero ottimali è stato prodotto un cubo avente dimensioni analoghe ai precedenti (10 mm x 10 mm x 10 mm).

Le analisi svolte su tale cubetto hanno mostrato risultati del tutto in linea con quelli raggiunti dai parametri antecedenti, con dimensioni prossime a quelle nominali; il trend è analogo a quello riscontrato in precedenza, con un errore dimensionale negativo lungo gli assi X e Y, di poco inferiore all'1% in valore assoluto, e un errore positivo lungo l'asse Z pari all'1%. Mediante le misure di densità secondo principio di Archimede è stato ottenuto un valore di densità di Archimede pari a 1,357 g/cm^3 e, in virtù di un valore di porosità aperta pari allo 0,18% e un valore di porosità chiusa dello 0,19%, la densità relativa ottenuta è risultata essere pari al 99,81%, analogo al valore raggiunto dal cubetto precedentemente scelto.

Analizzando i dati ottenuti, si è giunti alla conclusione che i parametri scelti risultano essere ottimali, sia in termini di densità raggiunta e tolleranze dimensionali che in termini di produzione di pezzi aventi una superficie maggiore.

3.2 Caratterizzazione meccanica: Tensile Test

Stabiliti i parametri ottimali, si è proceduto all'utilizzo di tali valori per la realizzazione dei provini di trazione, al fine di poter svolgere una prima caratterizzazione meccanica; come per la PA2200, i provini di trazione sono stati realizzati secondo la normativa EN ISO 527-2:2019, provini di tipologia 1a [38], e le caratteristiche geometriche sono mostrate in Tabella 3.

Per i seguenti Job, così come per tutti quelli svolti fino ad ora, è stata utilizzata una EOS Formiga P110 Velocis per il processo di selective laser sintering.

I parametri utilizzati, ottenuti dai precedenti DoE, sono:

- P = 25 W;
- V = 2500 mm/s;
- H_d = 0,32 mm;
- ED = 0,05 J/mm^2;
- Contour con P_c = 16 W e v_c = 1500 mm/s;

le temperature della building chamber e della removal chamber sono state impostate rispettivamente a 170 C° e 154 C°.

Tutte le prove di trazione sono state svolte mediante una Easydur AURA 10 T [47], mostrata in Figura 31, seguendo la normativa ISO527 e adoperando un estensometro con una lunghezza del calibro pari a 25 mm.

Figura 31 – Easydur AURA 10 T [47]

Per l'analisi dei dati ottenuti, nel rispetto della normativa EN ISO 527-1:2019 [48], è stato calcolato il modulo elastico secondo il metodo noto come "regression slope", secondo cui tale modulo, espresso in MPa, è rappresentato dalla pendenza della curva tensione-deformazione in un intervallo di deformazione compreso tra 0,0005 e 0,0025 calcolata mediante regressione lineare. In aggiunta al modulo di Young (E_t), sono stati determinati anche la resistenza a trazione (σ_m), il valore della sollecitazione a trazione corrispondente ad un valore di deformazione pari allo 0,2% ($\sigma_{0,2\%}$) e l'allungamento percentuale a rottura ε.

Essendo l'Alumide un materiale composto in larga parte da un materiale polimerico come la PA2200, il passaggio tra la parte di curva caratterizzata da un comportamento elastico e quella che, invece, rappresenta il comportamento plastico nel grafico sforzo-deformazione

non presenta una zona di transizione netta che separa il tratto lineare da quello non-lineare. È quindi stato necessario definire un valore di offset arbitrario, pari allo 0,2%, per identificare sul grafico il punto di snervamento; ne consegue che il valore identificato come $\sigma_{0,2\%}$ esprime la resistenza a snervamento [42].

Per studiare l'effetto dell'orientamento del pezzo all'interno del volume di lavoro, i provini di trazione sono stati stampati in direzioni differenti rispetto agli assi coordinati; in particolare si è scelto di utilizzare un sistema di orientamento in cui vengono identificate tre orientazioni primarie e per ciascuna di esse i provini seguono tre direzioni dette secondarie; in questo modo si ottengono nove combinazioni differenti da studiare.

Le direzioni primarie sono state identificate come:

- flat (f);
- vertical (v)
- z.

I provini orientati secondo la prima orientazione sono stati stampati con la superficie maggiore parallela al letto di polvere e diretta perpendicolarmente alla direzione di stampa. La direzione primaria identificata come vertical è ottenuta mediante una rotazione dei provini flat di 90° lungo il loro asse maggiore; in questo modo la superficie maggiore risulterà in direzione perpendicolare rispetto al letto di polvere.

I campioni che sono orientati secondo la direzione primaria identificata come z vengono realizzati lungo la direzione di stampa. Mentre nei provini orientati secondo le prime due direzioni, f e v, i singoli strati che compongono il pezzo risultano essere disposti in maniera parallela alla direzione di applicazione del carico, nel caso dei campioni orientati secondo la direzione z gli strati sono ortogonali alla direzione del carico.

La differente orientazione dei provini comporta una diversa distribuzione di energia sul letto di polvere per ciascuno strato; in particolare, ciò è legato alla diversa superficie dei provini che risulta essere esposta al fascio. L'area esposta risulta essere prossima a 2400 mm^2 per i provini in disposti secondo la direzione flat, circa 680 mm^2 per i campioni disposti secondo la direzione vertical, e solo 40 mm^2, con un massimo di 80 mm^2 in corrispondenza degli afferraggi, per i provini orientati secondo la direzione z; di conseguenza l'energia trasferita

al provino per ciascuno strato risulterà maggiore per i provini flat, mentre sarà minima nel caso dei campioni in direzione z.

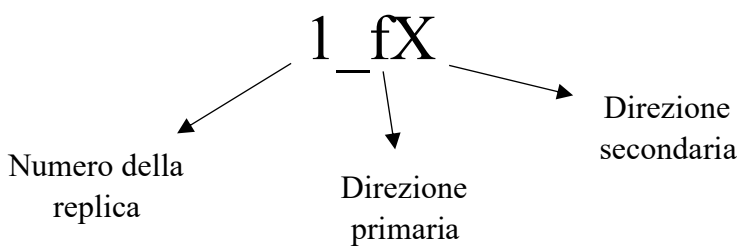
In aggiunta alla direzione primaria, per ciascuna di esse sono state stabilite tre direzioni secondarie:

- X;
- Y;
- D (diagonal, con inclinazione di 45° rispetto alle precedenti).

Le prime due direzioni secondarie identificano quei campioni posizionati secondo gli assi cartesiani sul piano x-y, ossia il piano di lavoro della Formiga. Per quanto riguarda, invece, la terza direzione secondaria, si ottiene mediante una rotazione di 45° sul piano (rispetto ad uno dei due assi cartesiani x e y).

Per ciascuna combinazione delle direzioni primarie e secondarie sono state realizzate 6 repliche al fine di ottenere un campione statistico consistente, per un totale di 54 provini.

Per identificare ciascun campione è stato adoperato un codice ID costituito nella maniera seguente:



In Figura 32 è possibile osservare le differenti combinazioni delle direzioni primarie e secondarie con cui sono stati stampati i provini.

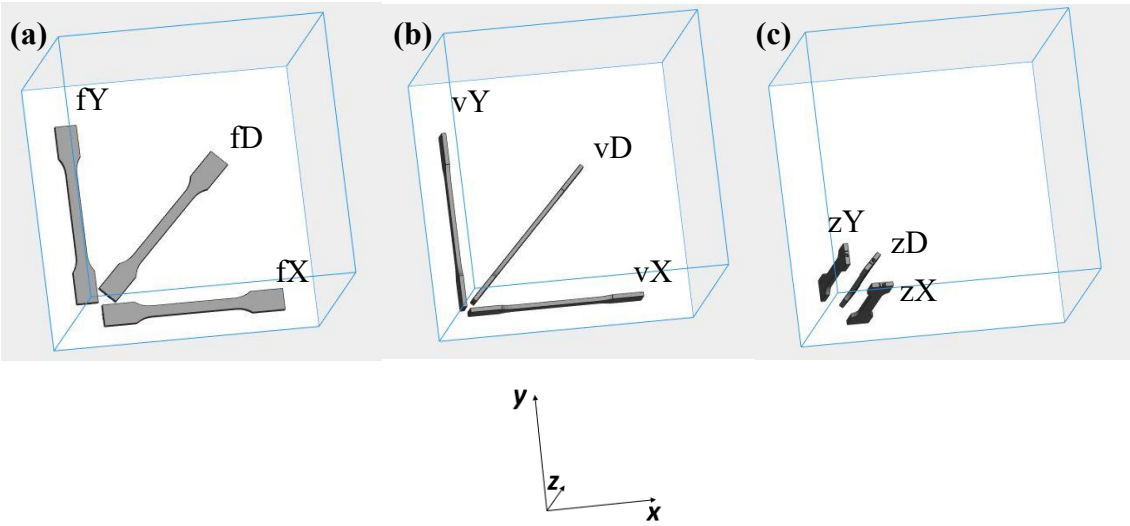


Figura 32 – Orientazioni dei campioni all'interno del volume di lavoro della macchina. Le tre immagini rappresentano le direzioni primarie: (a) flat, (b) vertical, (c) z, secondo l'asse. Per ciascuna direzione primaria vengono mostrate le tre direzioni secondarie (X, Y, D)

Una diversa orientazione primaria comporta anche un differente numero di layer necessari alla completa realizzazione del provino, nonché il tempo necessario al completamento del job. La Figura 33 mostra l'orientazione dei layer in relazione alla direzione del carico durante la prova di trazione.

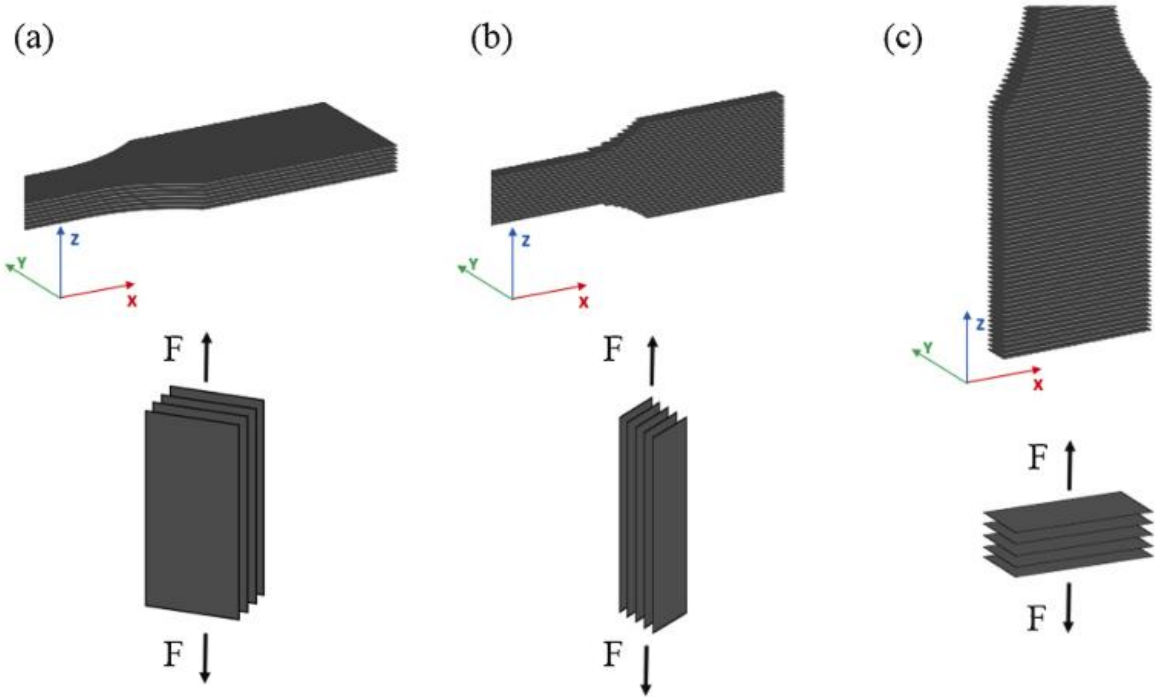


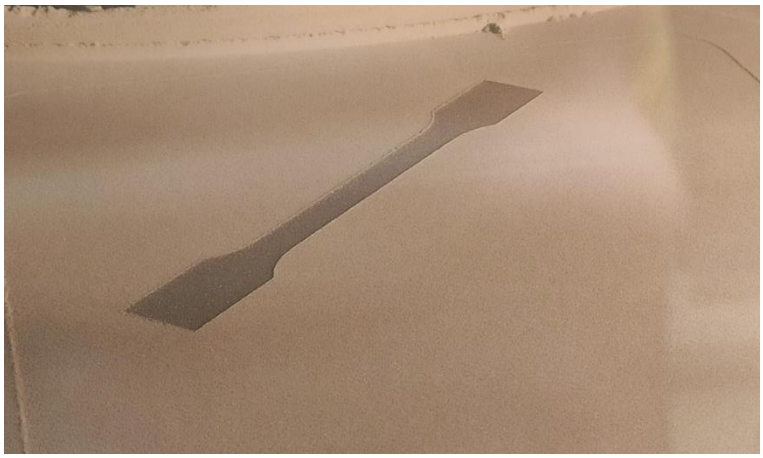
Figura 33 – Disposizione dei layer in relazione alla direzione di applicazione del carico (F) per ogni orientazione primaria. (a) Direzione flat, f; (b) Direzione vertical, v; (c) Direzione lungo l'asse z [42]

Per via dei problemi iniziali riscontrati nella realizzazione dei campioni, non è stato possibile produrre tutti i provini in un singolo job, disponendoli in maniera completamente randomica per evitare errori sistematici legati alla zona di realizzazione.

In fase di stampa, si è potuto constatare come la disposizione dei campioni rispetto al percorso della racla assume una importanza ancora più significativa per pezzi aventi una superficie maggiore. L'aspetto critico della fase di stampa riguarda la realizzazione dei primi due-tre layer del campione; questo è legato al fatto che, una volta portata a compimento la stampa dei primi strati di un provino, per sovrapponendo i nuovi layer vi è già una base solida a disposizione che tende a non far rialzare i bordi laterali.

In Figura 34b è possibile notare come, seppur vi sia la massima superficie esposta, i bordi non risultano eccessivamente rialzati dopo i primi strati, cosa che invece all'inizio era ben visibile (Figura 34a).

(a)



(b)

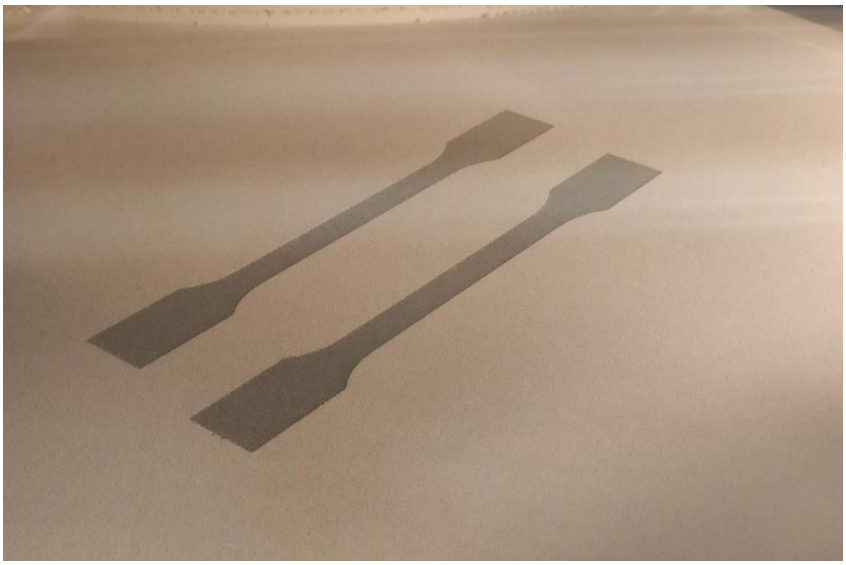


Figura 34 – Problematica dell'eccessivo rialzamento sui bodi del campione, (a) nei primi strati, (b) per gli stati successivi

Un'altra criticità riscontrata è legata all'orientamento di certi provini rispetto alla racla; a differenza dei campioni aventi direzione secondaria Y, quelli aventi direzione secondaria X subivano un contatto troppo diretto con la racla nel suo movimento da destra verso sinistra, e ciò comportava spesso uno spostamento dello strato appena stampato, con conseguente interruzione del Job.

Per risolvere questo problema, si è proceduto ad una rotazione di 5° lungo l'asse z di tutti i provini aventi direzione secondaria orientata secondo l'asse x (X), come è possibile

osservare in Figura 35a; questo semplice espediente ha comportato un notevole miglioramento in fase di stampa, riducendo notevolmente le interruzioni del Job.

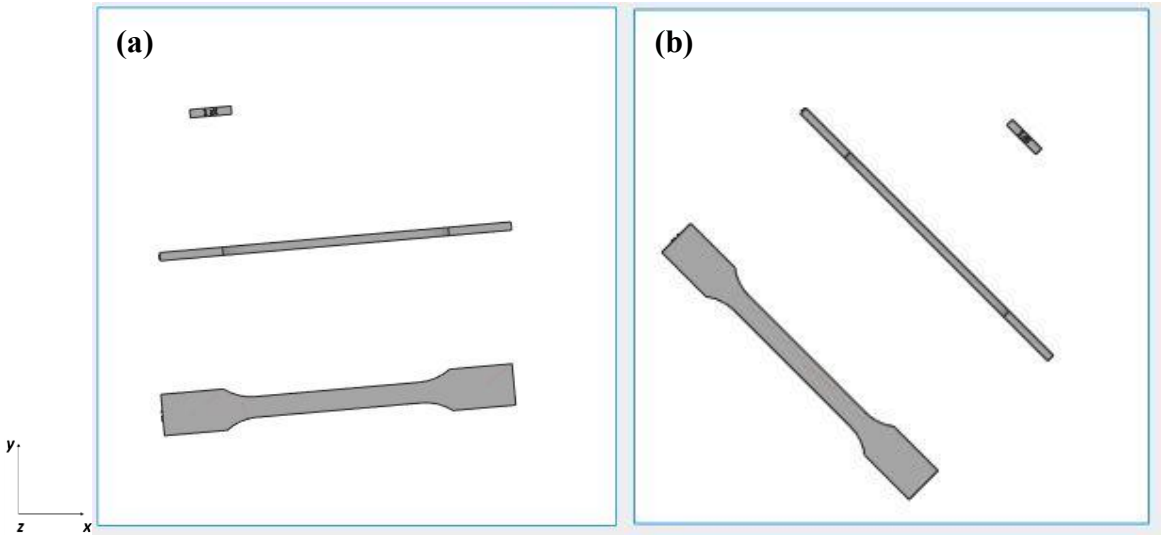


Figura 35 – Nuova disposizione dei provini aventi direzione secondaria X (a) e direzione secondaria D (b)

Un'ulteriore problematica riscontrata nel corso dei Job per la realizzazione dei provini di trazione in Alumide riguarda il movimento stesso della racla; è stato, infatti, notato come il suo passaggio da destra verso sinistra sia decisamente più critico che il percorso inverso da sinistra a destra. Questo, in particolare, si ripercuoteva sui pezzi aventi una direzione secondaria inclinata di 45° rispetto agli assi x e y (diagonal D); una rotazione di 45° per la fase di stampa differiva da una rotazione di -45°, e la soluzione migliore (presentata in Figura 35b) viene mostrata nel dettaglio, per i campioni aventi orientazione zD, in Figura 36.

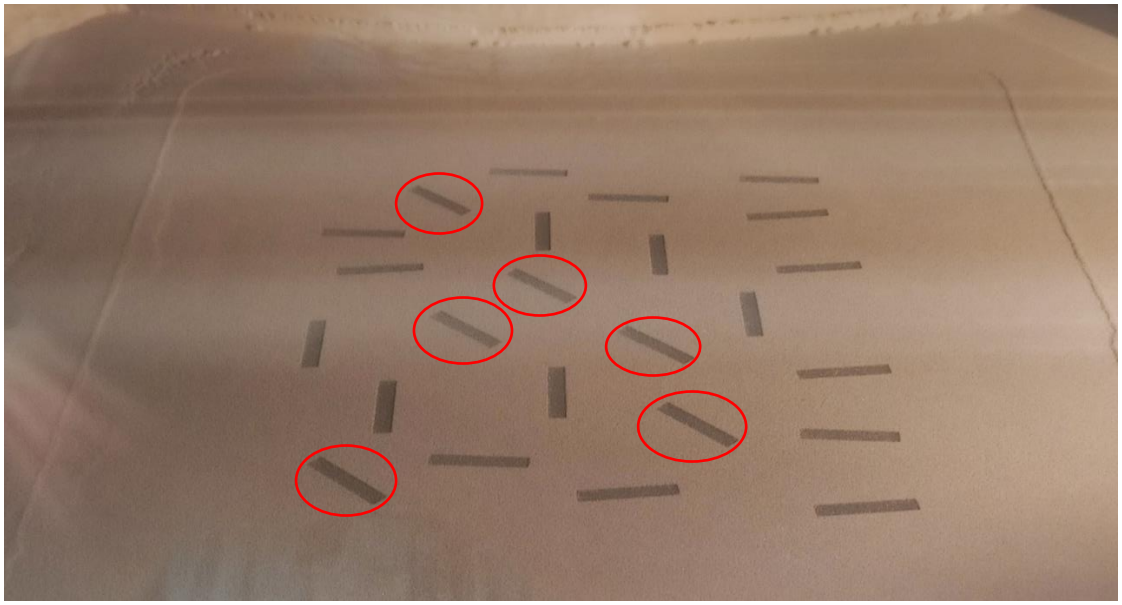


Figura 36 – Disposizione dei provini z in macchina con riferimento all'angolo di rotazione dei campioni zD

Infine, in termini di preparazione della macchina per la stampa, si è potuto constatare come, prima di iniziare un Job, convenga portare la macchina in temperatura e mantenerla in tale condizione per un certo periodo di tempo; questo perché iniziare un job immediatamente dopo il raggiungimento delle temperature della camera di lavoro e del letto di polvere prefissate comporta uno scorrimento della polvere ed una stesura dello strato non ottimale.

Capitolo 4: Risultati e discussione

I campioni estratti dalla macchina, mostrati in Figura 37, sono stati sottoposti alla prova di trazione, svolta come indicato dalle normative precedentemente citate.

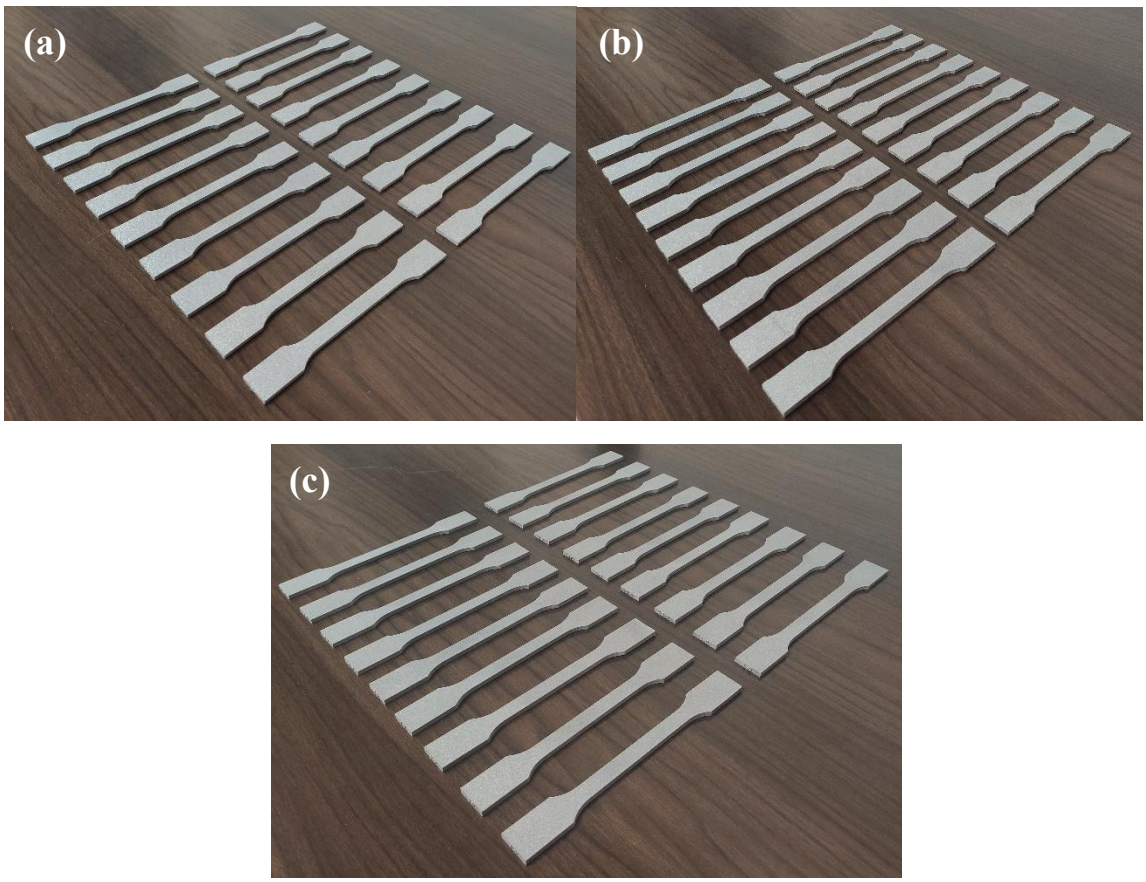


Figura 37 – Provini di trazione stampati mediante SLS in Alumide; (a) flat; (b) vertical; (c) lungo l'asse z

La totalità dei provini è risultata essere idonea alla procedura, senza grossi difetti macroscopici generati in fase di realizzazione. La Figura 38 mostra uno dei provini realizzati lungo la direzione di stampa, ossia avente direzione primaria descritta dall'asse z, in cui si può osservare un lieve slittamento dei primi due strati rispetto ai successivi; tuttavia, essendo tale difetto circoscritto ai primi strati situati su uno degli estremi di afferraggio del

provino ed essendo uno scostamento ridotto, tale difetto non influenza in alcun modo l'esito della prova di trazione, ed è quindi trascurabile.

Figura 38 – Particolare di un difetto di uno dei provini di trazione stampati lungo l'asse z

La procedura sperimentale precedentemente descritta è stata adoperata al fine di svolgere una corretta caratterizzazione meccanica dei provini prodotti in Alumide mediante la tecnologia di selective laser sintering.

La Tabella 15 riporta i risultati delle misurazioni della sezione ristretta delle repliche effettuate mediante un micrometro centesimale. In particolare, sono state misurate la larghezza (l) e lo spessore (s) per ciascuna sezione ristretta di ogni replica; in tabella sono riportati i valori calcolati come media delle grandezze misurate per le repliche per ciascuna combinazione delle orientazioni primarie e secondarie.

Tabella 15 – Misure dimensionali della sezione ristretta per i provini di trazione ottenuti mediante SLS. I valori riportati rappresentano un valore medio delle 6 repliche realizzate per ciascuna orientazione (SD rappresenta l'acronimo di standard deviation)

Orientazione	l [mm]	SD [mm]	s [mm]	SD [mm]
fX	9,83	0,01	4,17	0,03
fD	9,80	0,06	4,11	0,02
fY	9,84	0,05	4,13	0,05
vX	10,20	0,02	3,70	0,03
vD	10,30	0,02	3,66	0,01
vY	10,22	0,01	3,78	0,02
zX	9,78	0,02	3,56	0,03
zD	9,73	0,02	3,60	0,02
zY	9,71	0,02	3,63	0,02

Considerando che le misure nominali della sezione ristretta del provino, secondo la normativa EN ISO 527-2:2019 specimen type 1a, risultano essere:

- l = 10.0 mm;
- s = 4.0 mm;

si nota subito come le grandezze misurate, nella maggior parte dei casi, non si discostino eccessivamente dalle nominali, con uno scarto massimo di 0,29 mm per la larghezza, pari al 3% in eccesso, e, per quanto riguarda lo spessore, un discostamento massimo di 0,44 mm, che corrisponde al 11% in meno rispetto alla grandezza nominale desiderata.

La Figura 39 mostra una chiara tendenza per quanto riguarda la direzione primaria; è infatti possibile osservare come i provini flat presentino una larghezza inferiore rispetto alla dimensione nominale e uno spessore superiore, mentre un trend opposto è quello dei campioni orientati secondo la direzione vertical. Dai dati si nota, inoltre, come i provini flat presentino una deviazione standard maggiore.

I campioni stampati lungo l'asse z presentano invece una sezione ristretta avente dimensioni inferiori sia rispetto a quelle nominali che rispetto a quelle ottenute con i provini prodotti

lungo le altre due direzioni primarie; tuttavia la Tabella 16 mostra come i campioni stampati nella direzione dell'asse z risultano avere una lunghezza totale nettamente superiore a quella nominale (pari a 170 mm), con un valore di deviazione standard superiore di un ordine di grandezza rispetto alle altre due dimensioni.

La direzione secondaria, come si vede dai grafici sottostanti, non influenza in modo particolare i risultati ottenuti. È però possibile notare come gli errori percentuali dei provini flat risultino essere globalmente più bassi rispetto a quelli vertical e soprattutto rispetto a quelli orientati lungo l'asse z.

Tabella 16 – Misura della lunghezza dei provini prodotti nella direzione definita dall'asse z. I valori riportati rappresentano un valore medio delle 6 repliche realizzate per ciascuna orientazione

Orientazione	L [mm]	SD [mm]
zX	171,1	0,20
zD	171,4	0,38
zY	171,2	0,26

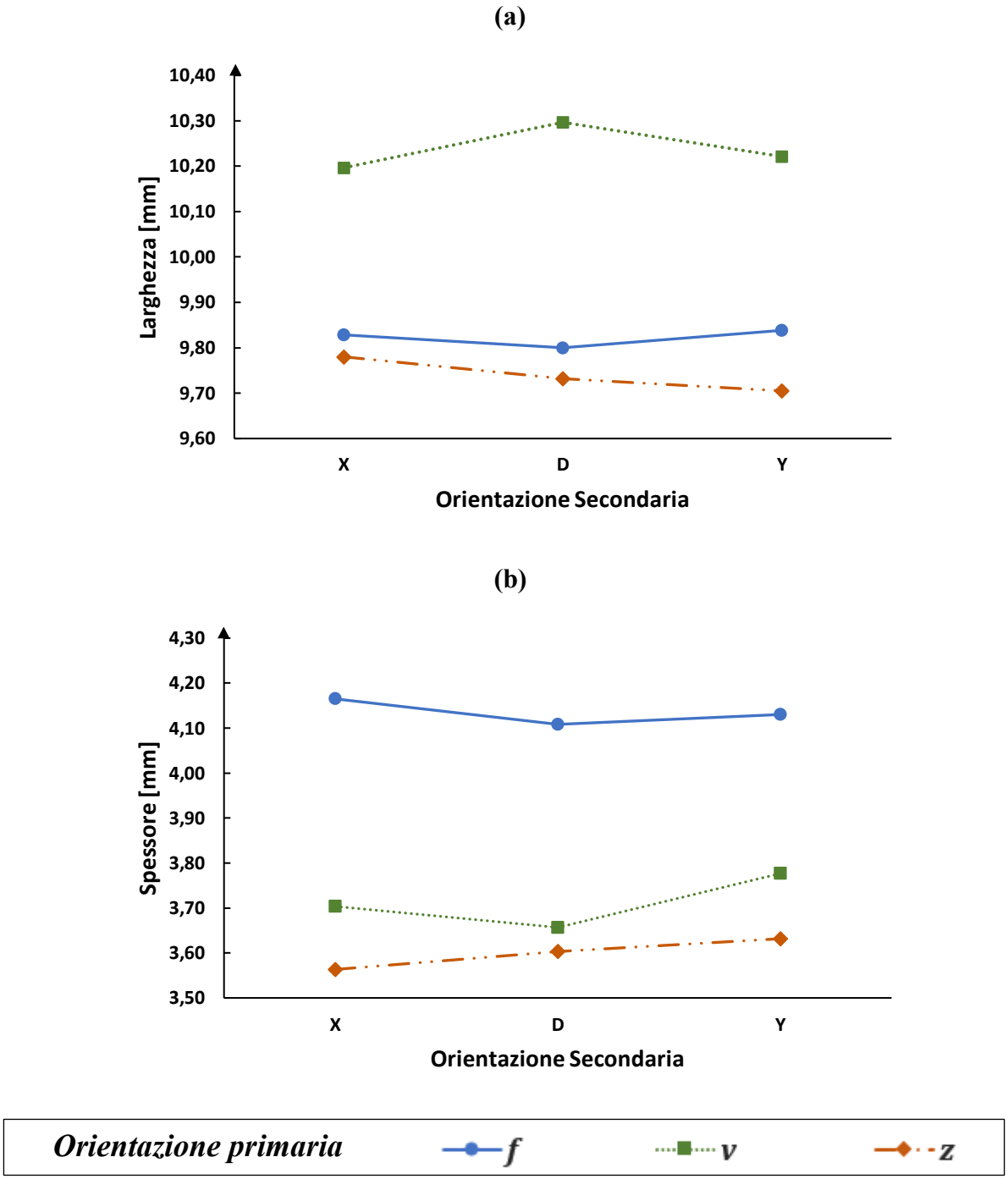
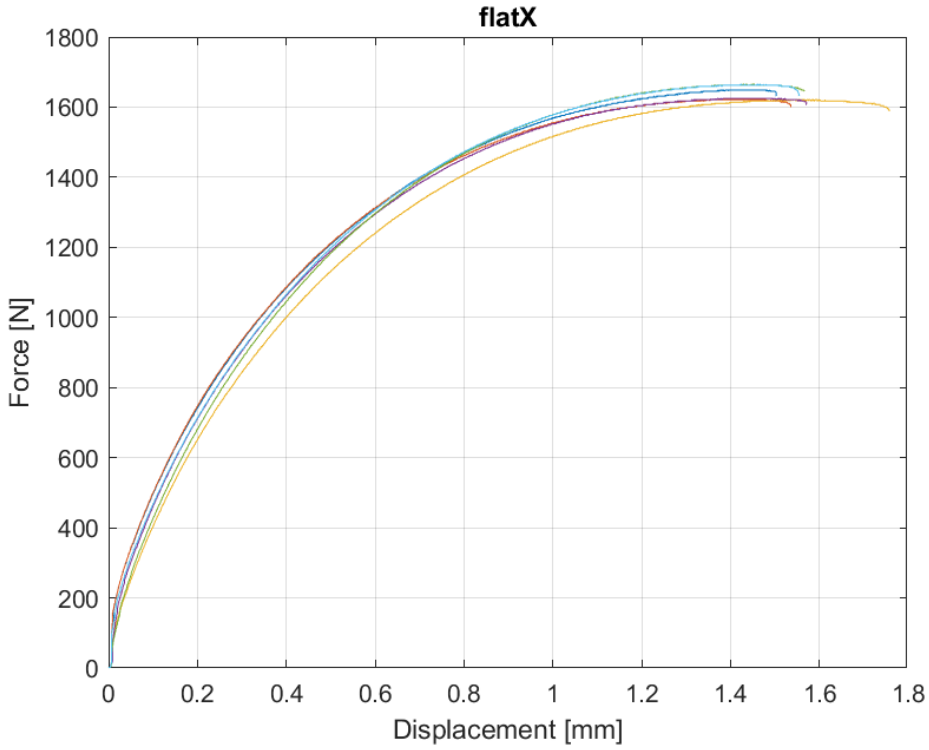
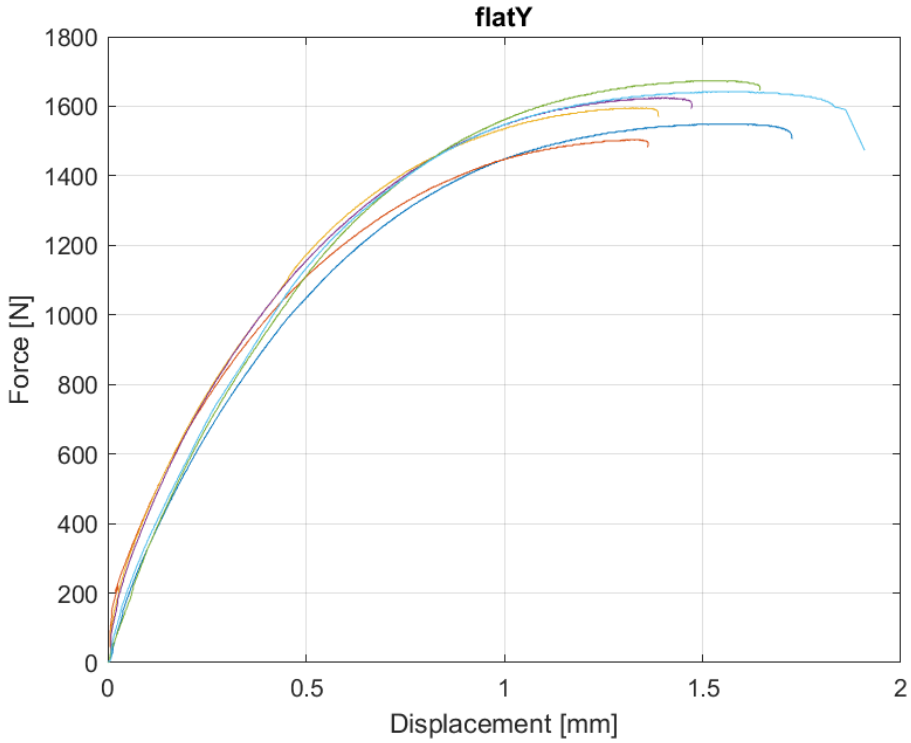


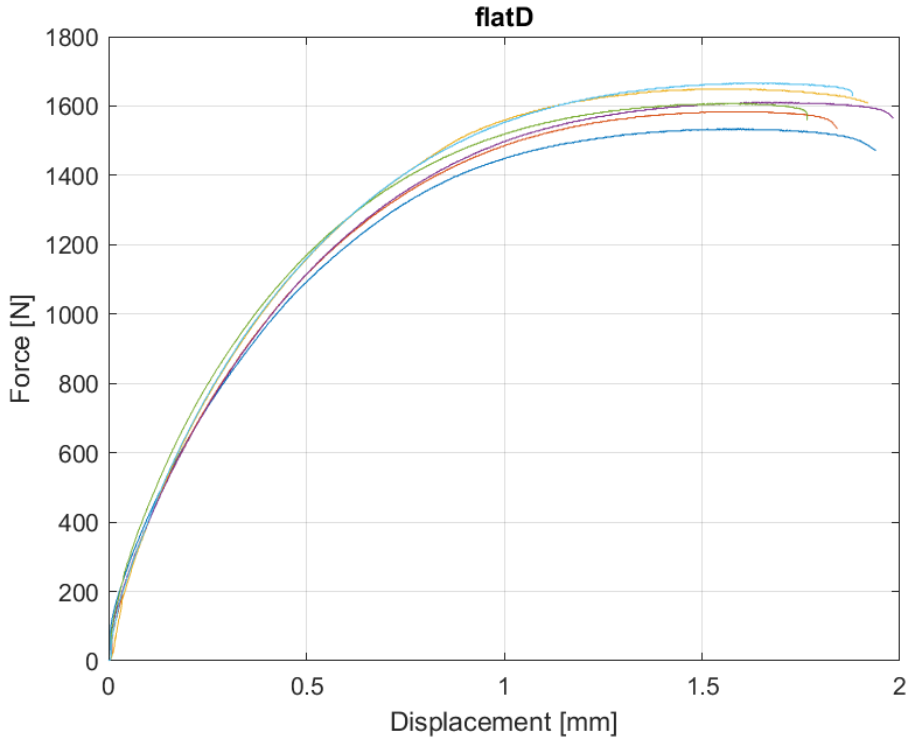
Figura 39 – Dimensioni della sezione ristretta dei provini in relazione all'orientazione secondaria: (a) larghezza; (b) spessore

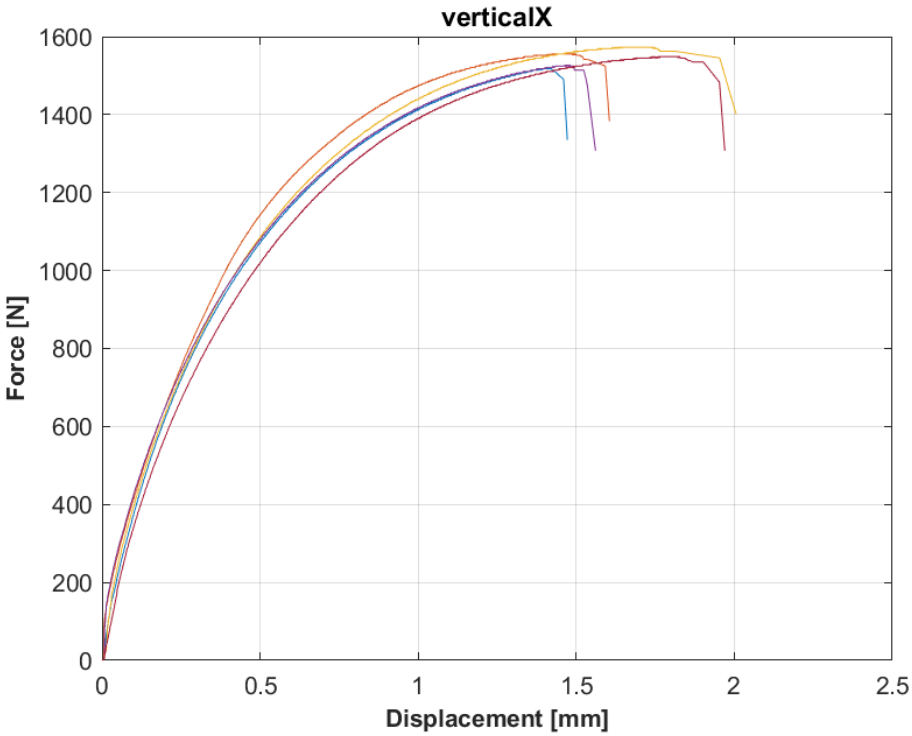
In Figura 40 è possibile osservare la totalità dei grafici Forza-Spostamento ottenuti in seguito alle prove di trazione di tutti i provini correttamente portate a termine; in ciascun grafico sono contenute le curve relative a tutte le repliche per la combinazione di direzione primaria

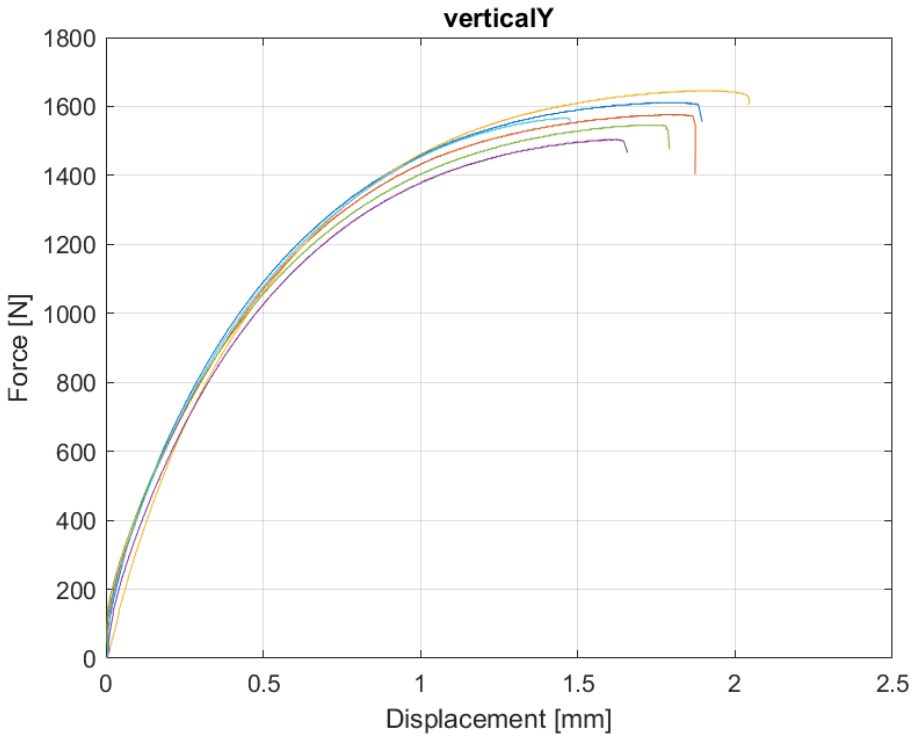
e secondaria in esame. Mediante questi grafici è possibile avere un'idea chiara della massima forza a cui il provino è riuscito a resistere durante la prova, tramite la quale è stata poi calcolata la resistenza a trazione σ_m attraverso il rapporto della stessa con la sezione effettiva della superficie ristretta, ottenuta in virtù delle misure dimensionali prese con il micrometro prima dell'inizio del test.

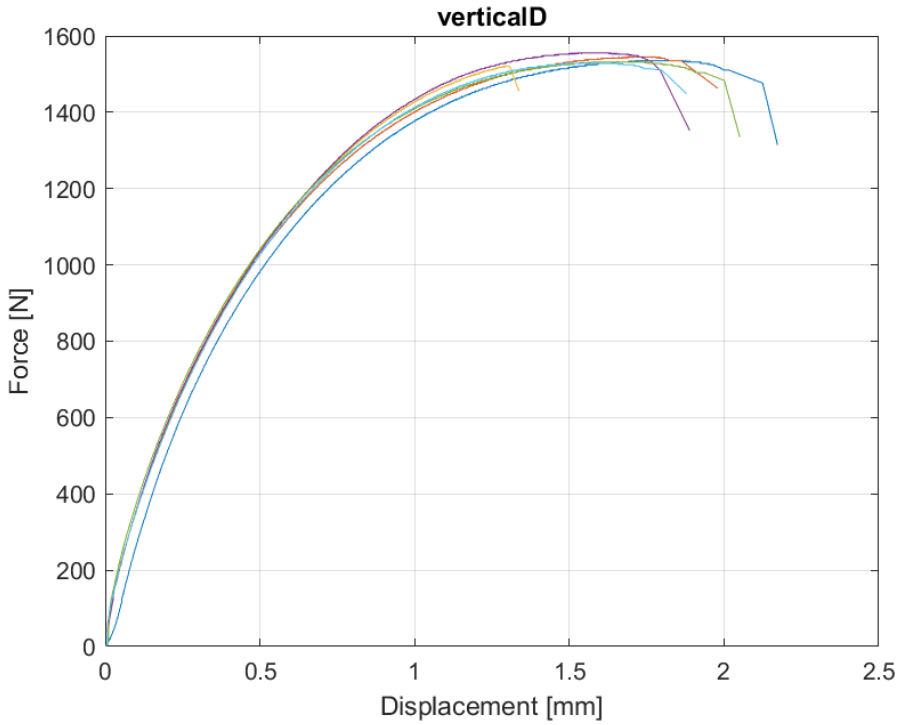


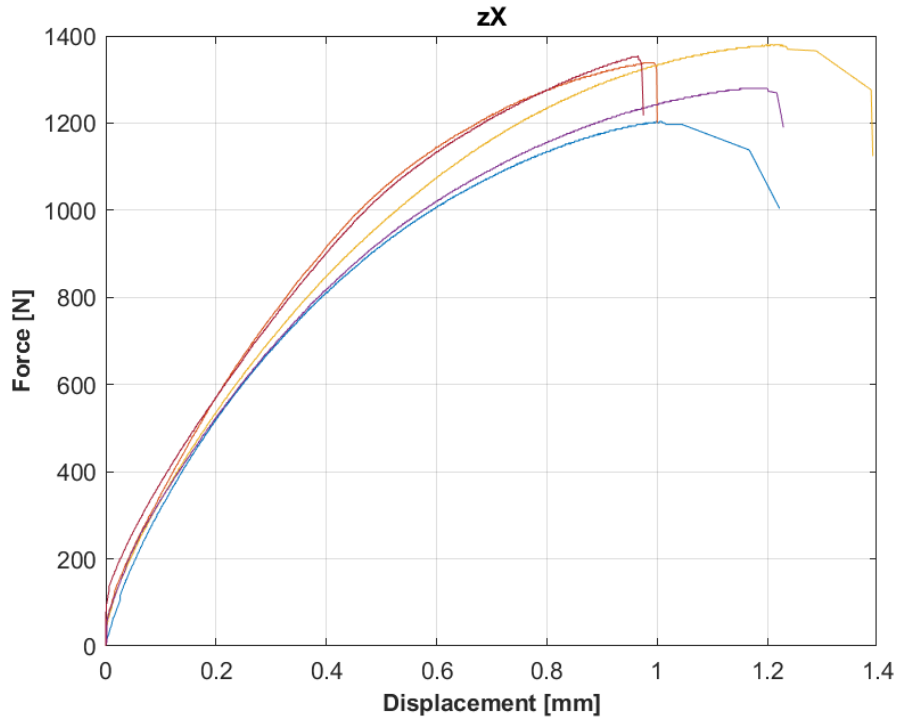

flatY
Force [N]
Displacement [mm]
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
0
0.5
1
1.5
2


flatD
Force [N]
Displacement [mm]
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
0
0.5
1
1.5
2


verticalX
Force [N]
Displacement [mm]
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
0
0.5
1
1.5
2
2.5


verticalY
Force [N]
Displacement [mm]
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
0
0.5
1
1.5
2
2.5


verticalD
Force [N]
Displacement [mm]
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
0
0.5
1
1.5
2
2.5


zX
Force [N]
Displacement [mm]
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
1.4

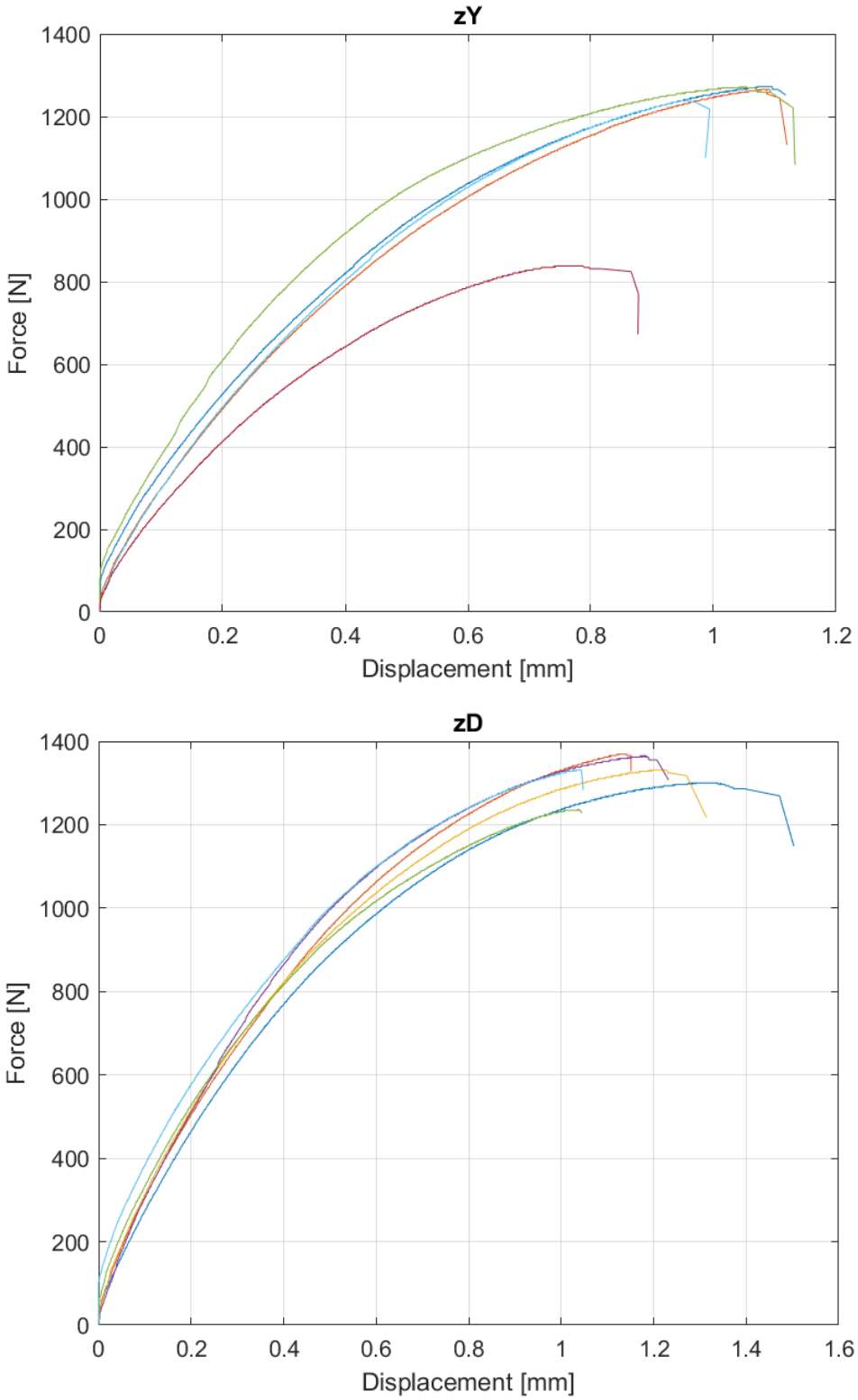


Figura 40 – Confronto tra le curve Forza-Spostamento per ciascuna configurazione. In ogni grafico sono rappresentati tutte le repliche correttamente testate

Tabella 17 – Risultati del test di trazione provini ottenuti mediante SLS. I valori riportati rappresentano un valore medio delle 6 repliche realizzate per ciascuna orientazione (SD rappresenta l'acronimo di standard deviation)

Orientation	Tensile Modulus E_t [MPa]	SD [MPa]	Tensile strength σ_m [MPa]	SD [MPa]
fX	3929,2	92,1	40,2	0,3
fD	3904	254	40	0,9
fY	3663,6	142,7	39,3	1
vX	4119,6	285	40,9	0,7
vD	3805,6	147,7	40,8	0,4
vY	3670,5	277,7	40,8	1,2
zX	3514,8	198,4	37,6	1,8
zD	3400,3	195,7	37,8	1,5
zY	3218,3	284,1	33,4	5,3

Orientation	Tensile stress at 0,2% $\sigma_{0,2\%}$ [MPa]	SD [MPa]	Elongation at break ε [%]	SD [%]
fX	27,5	1	3,3	0,2
fD	26,1	0,8	3,8	0,2
fY	26,1	1,9	3,2	0,4
vX	26	2,7	3,4	0,5
vD	24,8	1,7	3,7	0,6
vY	26,3	1,9	3,6	0,4
zX	28	3,2	2,3	0,3
zD	27	1,6	2,4	0,3
zY	25,7	3,6	2,1	0,2

Per ciascuna orientazione, le principali proprietà meccaniche sono state calcolate come media delle 6 repliche ed inserite all'interno della Tabella 17; fanno eccezione le orientazioni vX, zX e zY dove, a causa di problemi durante le prove di trazione quali lo slittamento dell'estensometro dalla sezione ristretta durante il test che hanno falsato i risultati, le repliche

correttamente analizzate sono state solo 5 (sono state dunque scartati i casi dei test non conformi). Si ribadisce comunque come, secondo la normativa meccanica; come per la PA2200, i provini di trazione sono stati realizzati secondo la normativa EN ISO 527-2:2019, sia necessario un minimo di 5 repliche affinché i risultati del test siano validi.

Analizzando i valori contenuti in tabella è possibile intuire come le proprietà meccaniche dei provini siano influenzate dall'orientazione all'interno della camera di lavoro durante il processo di stampa, sia per quanto riguarda la direzione primaria (f, v e z), ma anche in riferimento alla direzione secondaria (X, Y e D).

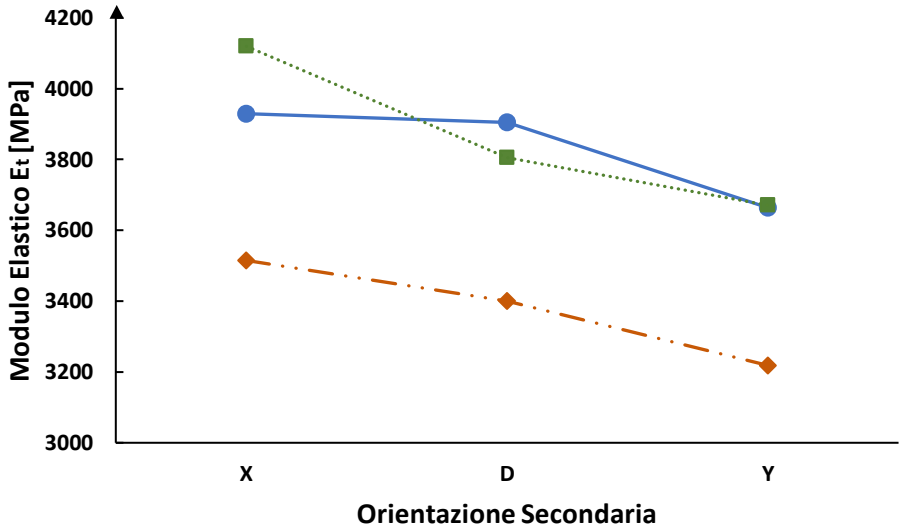
Fatta eccezione per l'allungamento a rottura, i provini flat presentano la minor dispersione di dati con riferimento ai valori ottenuti per le varie direzioni secondarie, mentre i provini vertical mostrano una dispersione superiore solo per quanto riguarda il modulo di Young. Di tutti i parametri presi in considerazione, per ciascuna orientazione, l'allungamento a rottura è quello che più risente dell'orientazione del provino, con uno scarto tra il valore massimo e il valore minimo assunto tra tutte le prove pari al 44,7%. Per contro, il parametro che mostra la maggior stabilità risulta essere il valore della sigma di trazione al 0,2% ($\sigma_{0,2\%}$).

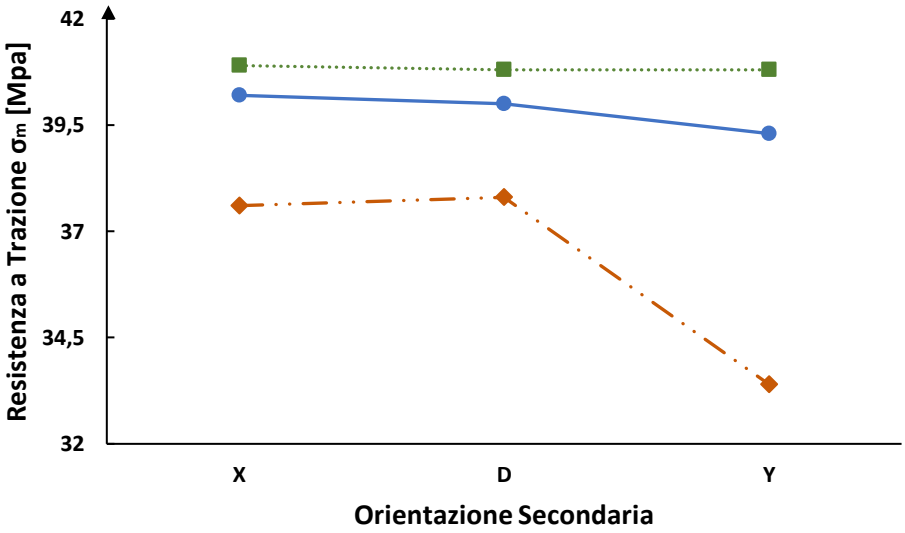
I provini vX presentano le proprietà meccaniche più alte (soprattutto per quanto riguarda modulo di trazione e resistenza a trazione), ma con un valore di deviazione standard elevato; in generale, il valore della σ_m per i campioni vertical risulta più elevato che rispetto a qualunque altra orientazione primaria.

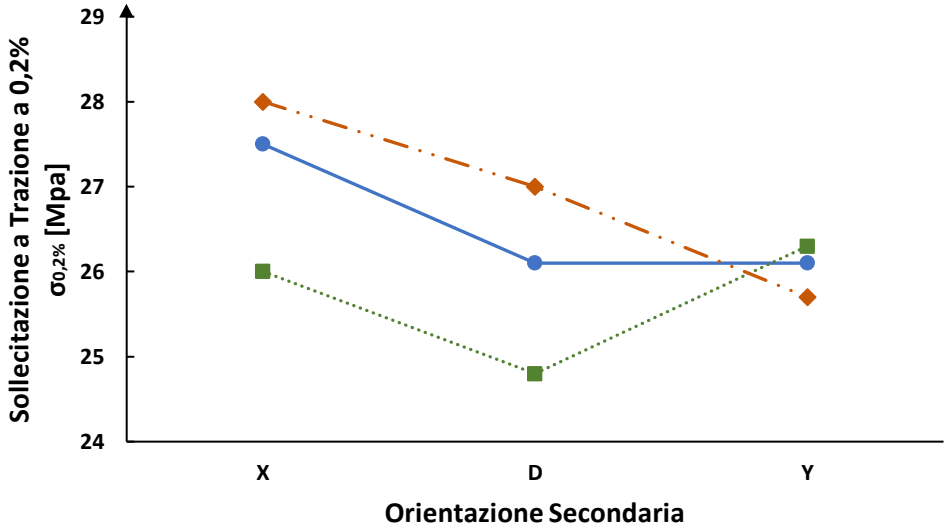
Tendenzialmente, i provini orientati lungo l'asse z presentano proprietà meccaniche più scarse, oltre che una deviazione standard maggiore generalmente più alta; in particolare, prendendo in considerazione il campione zY, il confronto con i provini flat e vertical è ancora più critico in termini di prestazioni meccaniche, ed in particolar modo in termini di resistenza a trazione e allungamento a rottura. Questo risultato è legato sicuramente al fatto che, durante le prove di trazione, il carico è orientato in direzione perpendicolare ai singoli strati, e quindi agisce tendendo a separare tra loro gli strati, cosa che invece non accade per le altre due direzioni (f e v) in cui il carico agisce parallelamente alla direzione degli strati, come mostrato in Figura 33.

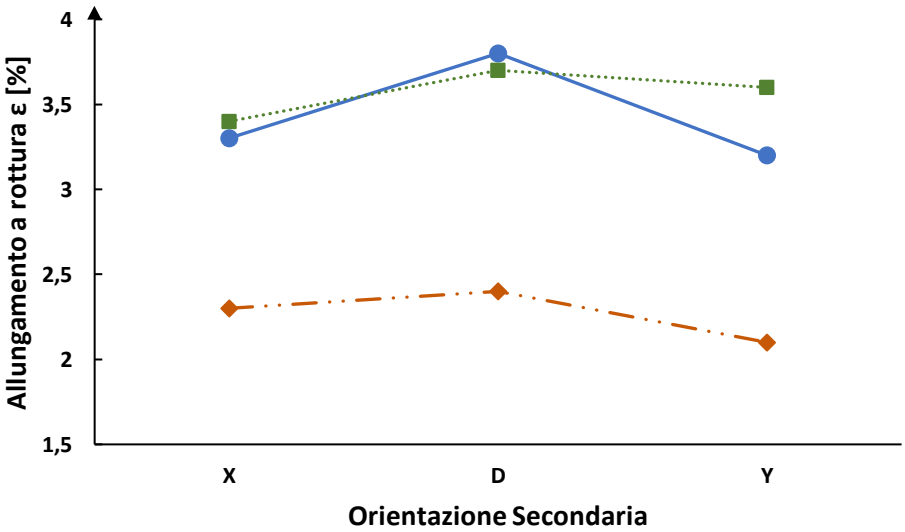
Escludendo l'allungamento percentuale ε, la direzione X è quella che permette di raggiungere le migliori performance, con rare eccezioni in cui si discosta molto poco dal massimo.

La Figura 41 mette in evidenza l'effetto che l'orientazione secondaria ha sulle diverse proprietà meccaniche, per ciascuna delle orientazioni primarie. I campioni flat presentano un comportamento analogo al variare della direzione secondaria per ciascuna direzione primaria, esibendo quindi un certo trend.









Orientazione primaria	*f*	*v*	*z*

Figura 41 – Effetto dell'orientazione dei provini in macchina sulle proprietà meccaniche

In Figura 42 sono riportate le foto delle superfici di frattura di due campioni al termine della prova di trazione.

Si nota subito come le superfici siano per lo più piane, e non vi sia una strizione visibile della sezione ristretta; questo è dovuto al fatto che la frattura avvenga in modo fragile, come testimoniato dai valori ottenuti di allungamento percentuale a rottuta, compresi tra il 2% ed il 4%, con un minimo per i provini realizzati nella direzione dell'asse z.

Nel caso di un numero ristretto di provini, come l'esempio mostrato nella figura in basso a destra, osservando la superficie di rottura è possibile notare la presenza di una cricca centrale, probabilmente causata dalla presenza di un difetto o una porosità interna nel campione.

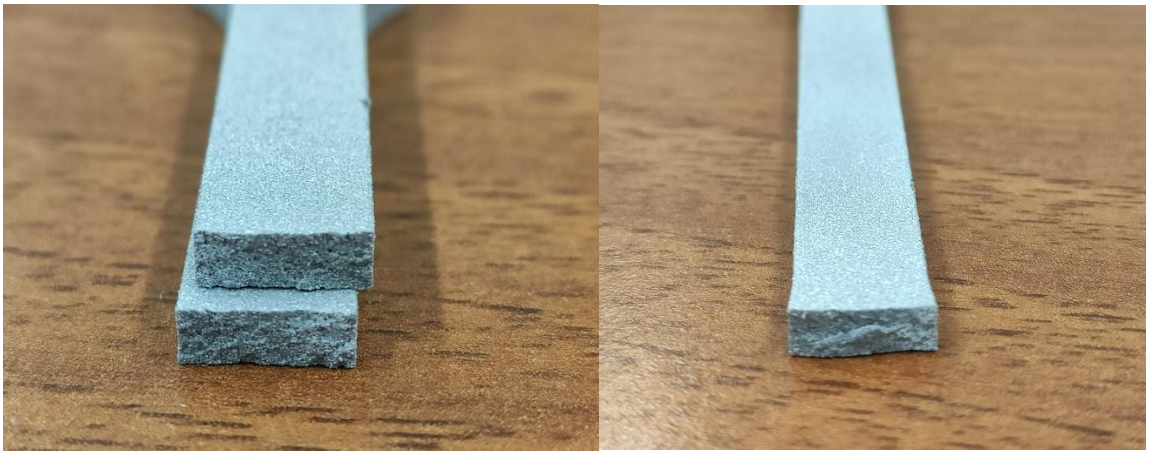


Figura 42 – Superficie di frattura di due provini

Conclusioni

In questa tesi sono state studiate le proprietà meccaniche mostrate da un materiale composito come l'Alumide prodotto mediante processo di Selective Laser Sintering, a seguito di un'attenta analisi svolta per identificarne i parametri ottimali da utilizzare.

Come metro di valutazione dei parametri è stato utilizzato il valore di densità misurato mediante principio di Archimede, processo che permette di identificare anche il valore percentuale delle porosità interne al campione, mentre i campioni sono stati prodotti seguendo un DoE a tre fattori: potenza del laser, velocità di scansione e Hatch Distance. Dai dati raccolti si è potuto constatare come i valori di densità ottenuti per i campioni siano estremamente positivi, con risultati prossimi al valore teorico identificato in letteratura.

Il risultato migliore ha permesso di raggiungere un valore di densità pari 1,357 g/cm^3, con una porosità chiusa ridotta (0,19%). I parametri scelti tra i casi studiati sono: P = 25W, v = 2500 mm/s, H_d = 0,32 mm, ED = 0,05 J/mm^2, P_c = 16 W e v_c = 1500 mm/s. Oltre che per il valore di densità ottenuto, la scelta di questi parametri ha permesso di conciliare la necessità di un campione finale avente buone caratteristiche con quella di un processo più stabile dal punto di vista termico, risultando dunque un buon compromesso.

Dal lavoro di tesi e dalle analisi effettuate in merito alla caratterizzazione meccanica mediante test di trazione è emerso come il modulo elastico dei provini realizzati in Alumide risulti essere prossimo ai 3800 Mpa indicati nei Datasheet per la maggior parte delle orientazioni provate, se non superiore. Questo testimonia come tale materiale composito permetta di ottenere dei pezzi con un elevato valore di rigidezza, soprattutto se confrontato con il solo polimero che ne costituisce la matrice. Questo risultato lo rende adatto per l'utilizzo in diverse applicazioni in vari ambiti. Per quanto riguarda l'allungamento percentuale a rottura, i risultati ottenuti risultano, in linea con il meccanismo di rottura dei provini, testimoniano come il comportamento del materiale sia pressoché fragile, in quanto i valori risultano pari al 3-4%, con un minimo per i provini orientati in fase di realizzazione con l'asse principale parallelo all'asse z pari al 2,1%.

Un ulteriore risultato significativo è legato all'influenza dell'orientazione dei campioni in fase di produzione. I campioni sono stati posizionati secondo tre direzioni primarie (flat,

vertical e z) e per ciascuna di esse sono state definite tre direzioni secondarie (X, Y e D). Dai risultati ottenuti si nota come la direzione primaria ha un'influenza notevole sulle proprietà meccaniche del provino di trazione; da questo punto di vista la direzione z è quella che conduce alle proprietà più basse, e ciò è legato alla direzione di applicazione del carico durante la prova che tende ad attuare una vera e propria delaminazione dei layer, perpendicolari ad esso. Per contro, la direzione primaria che permette di ottenere le migliori proprietà è la vertical.

Per quanto riguarda, infine, l'influenza della direzione secondaria, si è constatato come la direzione lungo l'asse X è quella che consente di ottenere le migliori proprietà, ad eccezione dell'allungamento a rottura. È necessario però specificare come l'influenza della direzione secondaria risulti essere molto ridotta, come testimoniato dai valori ridotti delle deviazioni standard calcolate sui valori medi per ciascuna proprietà e ciascuna direzione primaria, mostrati in Tabella 18.

Tabella 18 – Deviazioni Standard calcolate sui valori medi per ogni proprietà misurata

Orientazione Primaria	Dev. Standard Modulo Elastico [MPa]	Dev. Standard Resistenza a trazione [MPa]	Dev. Standard Sollecitazione a trazione a 0,2% [MPa]	Dev. Standard Allungamento a rottura [%]
f	146,61	0,47	0,81	0,32
v	230,41	0,06	0,79	0,15
z	149,53	2,48	1,15	0,15

Bibliografia

[1] "Additive manufacturing: una storia di brevetti," *Il progettista industriale*. https://www.ilprogettistaindustriale.it/additive-manufacturing-una-storia-di-brevetti/.

[2] L. Iuliano, "Fabbricazione Additiva / Additive Manufacturing." .

[3] A. Mazzoli, G. Moriconi, and M. G. Pauri, "Characterization of an aluminum-filled polyamide powder for applications in selective laser sintering," *Mater. Des.*, vol. 28, no. 3, pp. 993–1000, 2007, doi: 10.1016/j.matdes.2005.11.021.

[4] S. F. Wen *et al.*, "Investigation and development of large-scale equipment and high performance materials for powder bed laser fusion additive manufacturing: This paper reports a uniform preheating technique, a multi-laser scanning technique and a technique to prepare nylon," *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 9, no. 4, pp. 213–223, 2014, doi: 10.1080/17452759.2014.949406.

[5] D. I. Stoia, E. Linul, and L. Marsavina, "Influence of manufacturing parameters on mechanical properties of porous materials by selective laser sintering," *Materials (Basel).*, vol. 16, no. 6, 2019, doi: 10.3390/ma12060871.

[6] D. I. Stoia, L. Marsavina, and E. Linul, "Mode I fracture toughness of polyamide and alumide samples obtained by selective laser sintering additive process," *Polymers (Basel).*, vol. 12, no. 3, 2020, doi: 10.3390/polym12030640.

[7] D. I. Stoia and L. Marsavina, "Effect of aluminum particles on the fracture toughness of polyamide-based parts obtained by selective laser sintering (SLS)," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 18, pp. 163–169, 2019, doi: 10.1016/j.prostr.2019.08.150.

[8] D. I. Stoia, L. M. Mar¸savina, and E. Linul, "Correlations between Process Parameters and Outcome Properties of Laser-Sintered Polyamide," 2019, doi: 10.3390/polym11111850.

[9] L. Marsavina and D. I. Stoia, "Flexural properties of selectively sintered polyamide and Alumide," *Mater. Des. Process. Commun.*, vol. 2, no. 1, 2020, doi: 10.1002/mdp2.112.

[10] D. I. Stoia, L. Marsavina, and C. Vigaru, “Influence of the Process Parameters on the Shape and Dimensions of the Parts Obtained by Selective Laser Sintering (SLS),” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 416, no. 1, doi: 10.1088/1757-899X/416/1/012082.

[11] I. Gibson, D. W. Rosen, and B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*. Springer, 2015.

[12] P. Parandoush and D. Lin, “A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites,” *Composite Structures*, vol. 182. Elsevier Ltd, pp. 36–53, Dec. 15, 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.08.088.

[13] A. P. Pilipovi´c, T. Brajlih, and I. Drstvenšek, “Influence of Processing Parameters on Tensile Properties of SLS Polymer Product,” doi: 10.3390/polym10111208.

[14] R. D. Goodridge, C. J. Tuck, and R. J. M. Hague, “Laser sintering of polyamides and other polymers,” *Progress in Materials Science*, vol. 57, no. 2. Pergamon, pp. 229–267, Feb. 01, 2012, doi: 10.1016/j.pmatsci.2011.04.001.

[15] A. Pilipovic´, B. Valentan, and M. Šercer, “Influence of SLS processing parameters according to the new mathematical model on flexural properties,” 2016.

[16] Ö. Ilkgün, “Effects of Production Parameters on Porosity and Hole Properties in Laser Sintering Rapid Prototyping Process,” 2005.

[17] A. Pilipovit, I. Drstvenšek, and M. Šercer, “Mathematical Model for the Selection of Processing Parameters in Selective Laser Sintering of Polymer Products,” 2014, doi: 10.1155/2014/648562.

[18] P. K. Jain, P. M. Pandey, and P. V. M. Rao, “Tailoring material properties in layered manufacturing,” *Mater. Des.*, vol. 31, no. 7, pp. 3490–3498, Aug. 2010, doi: 10.1016/j.matdes.2010.02.029.

[19] G. Vitor Salmoria, C. H. Ahrens, P. Klauss, R. A. Paggi, R. G. Oliveira, and A. Lago, “Rapid Manufacturing of Polyethylene Parts With Controlled Pore Size Gradients Using Selective Laser Sintering,” 2007.

[20] M. Schmidt, D. Pohle, and T. Rechtenwald, “Selective laser sintering of PEEK,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 56, no. 1, pp. 205–208, Jan. 2007, doi:

10.1016/j.cirp.2007.05.097.

[21] “Poliammidi.” https://imballaggirinnovabili.weebly.com/poliammidi.html.

[22] “Struttura PA12.” https://www.plasticfinder.it/pa/pa12/poliammide-12-nylon-12.

[23] “EOS PA12 powder Datasheet.” https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-plastic/sls-polymer-materials/polyamide-pa-12-alumide.

[24] R. M. Jones, *Mechanics Of Composite Materials*. 2018.

[25] L. B. Chyuan, “Linear Static Finite Element Analysis of Composites Hat-Stiffened Laminated Plates,” 2005.

[26] T. H. C. Childs and A. E. Tontowi, “Selective laser sintering of a crystalline and a glass-®lled crystalline polymer: experiments and simulations,” 2001.

[27] H. Chung and S. Das, “Processing and properties of glass bead particulate-filled functionally graded Nylon-11 composites produced by selective laser sintering,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 437, no. 2, pp. 226–234, Nov. 2006, doi: 10.1016/j.msea.2006.07.112.

[28] T. J. Gill and K. K. B. Hon, “Experimental investigation into the selective laser sintering of silicon carbide polyamide composites.”

[29] K. K. B. Hon and T. J. Gill, “Selective laser sintering of SiC/polyamide composites,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 52, no. 1, pp. 173–176, Jan. 2003, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60558-7.

[30] R. D. Goodridge *et al.*, “Processing of a Polyamide-12/carbon nanofibre composite by laser sintering,” *Polym. Test.*, vol. 30, no. 1, pp. 94–100, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.polymertesting.2010.10.011.

[31] H. Chung and S. Das, “Functionally graded Nylon-11/silica nanocomposites produced by selective laser sintering,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 487, no. 1–2, pp. 251–257, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.msea.2007.10.082.

[32] H. Zheng, J. Zhang, S. Lu, G. Wang, and Z. Xu, “Effect of core-shell composite particles on the sintering behavior and properties of nano-Al2O3/polystyrene composite prepared by SLS,” *Mater. Lett.*, vol. 60, no. 9–10, pp. 1219–1223, May

2006, doi: 10.1016/j.matlet.2005.11.003.

[33] D. I. Stoia, M. Nicoara, A. Raduta, and C. Locovei, “Alumide sinterization aspects according to layer orientation, in rapid prototyping process,” *Solid State Phenom.*, 2016.

[34] “EOS ALUMIDE powder Datasheet.” EOS e-Manufacturing Solutions, [Online]. Available: https://eos.materialdatacenter.com/eo/material/pdf/436282/Alumide?sLg=en&rnd=1615577276975.

[35] “Gramho.” https://gramho.com/media/1537022632636767661.

[36] “Alumide PA12 caricato alluminio per dime di montaggio con tecnologia SLS.” https://www.prosilas.com/alumide-pa12-caricato-alluminio-per-dime-di-montaggio-con-tecnologia-sls/.

[37] J. Combrinck, “Alumide tooling for limited production plastic injection,” 2018.

[38] “EN ISO 527-2:2019: specimen type 1A.” .

[39] “UNI EN ISO 178:2019.” .

[40] B. Partee, S. J. Hollister, and S. Das, “Selective Laser Sintering Process Optimization for Layered Manufacturing of CAPA® 6501 Polycaprolactone Bone Tissue Engineering Scaffolds,” *J. Manuf. Sci. Eng.*, 2006.

[41] “EOS FORMIGA P 110 Velocis,” *EOS e-Manufacturing Solutions*. https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-plastic/eos-polymer-systems/formiga-p-110-velocis.

[42] F. Calignano, F. Giuffrida, and M. Galati, “Effect of the build orientation on the mechanical performance of polymeric parts produced by multi jet fusion and selective laser sintering,” *J. Manuf. Process.*, vol. 65, pp. 271–282, 2021, doi: 10.1016/j.jmapro.2021.03.018.

[43] A. Pilipović *et al.*, “Influence of laser sintering parameters on mechanical properties of polymer products,” 2010.

[44] B. Caulfield, P. E. McHugh, and S. Lohfeld, “Dependence of mechanical properties

of polyamide components on build parameters in the SLS process," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 182, no. 1–3, pp. 477–488, 2007, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.09.007.

[45] ASTM, "ASTM B962-17-Standard Test Methods for Density of Compacted or Sintered Powder Metallurgy (PM) Products Using Archimedes' Principle." 2017.

[46] M. Galati and P. Minetola, "materials Analysis of Density, Roughness, and Accuracy of the Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) Process for Metal Parts," doi: 10.3390/ma12244122.

[47] "EasyDur Aura." [Online]. Available: https://www.easydur.com/aura-tensile/.

[48] "EN ISO 527-1:2019." .

Ringraziamenti

Per concludere questi anni di studio e raggiungere un traguardo così importante, quale la laurea magistrale in ingegneria meccanica, sono stati necessari tantissimo studio, grande impegno e notevoli sacrifici. Tuttavia, ciò non sarebbe stato possibile senza l'amore, l'affetto e il sostegno di parenti e amici, a cui desidero rivolgere i miei più sinceri ringraziamenti per aver sempre creduto in me nel corso di questo lungo e, spesso, difficile percorso.

Le prime persone che meritano di essere ringraziate sono i miei genitori, mamma e papà, da cui ho imparato a pormi degli obiettivi, a dare tutto me stesso per raggiungerli, ad essere paziente e a non farmi influenzare dai periodi negativi che, inevitabilmente, si presentano nella vita. È grazie soprattutto ai loro sforzi e sacrifici se ho avuto l'opportunità di studiare in una delle migliori Università e di formarmi al meglio per il mondo del lavoro.

Ringrazio mio fratello, che, nonostante la lontananza, mi è stato sempre vicino per supportarmi e consigliarmi nel mio cammino, grazie anche alla sua esperienza.

Un sentito ringraziamento ai miei amici di sempre, perché mi hanno aiutato ad alternare le fatiche a momenti di gioia e spensieratezza, facendomi diventare una persona migliore. L'aver vissuto gli ultimi anni lontano dalla mia città mi ha permesso di fare nuove conoscenze, un grazie speciale, quindi, va a coloro con i quali ho potuto condividere questa esperienza e che mi hanno fatto sentire il loro calore e affetto.

Desidero, inoltre, ringraziare tutti i parenti, vicini e lontani, che hanno sempre fatto il "tifo" per me, aspettando con ansia di potermi vedere raggiungere questo significativo traguardo.

Infine, ringrazio il Prof. Luca Iuliano per la passione che mi ha comunicato per l'Additive Manufacturing, rendendomi in grado di mettere in pratica le conoscenze necessarie per portare a termine il lavoro di tesi. In particolare, vorrei ringraziare l'Ing. Manuela Galati e l'Ing. Flaviana Calignano, per la disponibilità e la dedizione dimostrate, per essere riuscite a trasmettermi le conoscenze acquisite in tanti anni di esperienza, e l'Ing. Marco Viccica, per avermi seguito durante tutto il percorso in laboratorio permettendomi di integrarmi al meglio in un ambiente per me nuovo, facendomi sentire parte del gruppo.